

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Хіміко-технологічний факультет

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів

«На правах рукопису»
УДК 662.92

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Т.В. Бойко

« » грудня 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**на тему: «Математичне моделювання процесів утворення оксидів азоту
при спалюванні органічного палива»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи ХА-71мп

Стаднік Владислав Андрійович _____

Науковий керівник:

Доц. каф. КХТП, к.т.н., доц.

Безносик Ю.О. _____

Консультант з розроблення стартап-проекту:

Доц. каф. економіки і підприємства, к.е.н., доц.,

Тюленєва Ю.В. _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Хіміко-технологічний факультет**

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» («Комп'ютерно-інтегровані технології сталих хімічних виробничих комплексів»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри

_____ Т.В. Бойко

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Стадніку Владиславу Андрійовичу**

1. Тема дисертації «Математичне моделювання процесів утворення оксидів азоту при спалюванні органічного палива», науковий керівник дисертації Безносик Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації: _____
3. Об'єкт дослідження: комп'ютерно-інтегровані технології аналізу процесу утворення оксидів азоту при згоранні органічного палива;
4. Вихідні дані: склад робочої маси палива марки антрацит, конструкційні особливості котла ТПП-210А;
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: проаналізувати літературні джерела за обраною тематикою; теоретичний і розрахунковий аналіз використовуваних в розрахунковій практиці кінетичних схем хімічних реакцій утворення оксидів азоту; вибір математичної моделі утворення оксидів азоту при спалюванні органічного палива в котлах з урахуванням обраної кінетичної схеми; спроектувати та програмно реалізувати математичну модель утворення оксидів азоту при спалюванні органічного палива; провести моделювання утворення оксидів азоту за допомогою розрахункового пакету FIRE 3D; розроблення стартап-проект;
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: електронна презентація у середовищі MS PowerPoint;

7. Орієнтовний перелік публікацій: Математичне моделювання викидів оксидів азоту при згоранні органічного палива; Моделювання утворення оксидів азоту при згоранні органічного палива;

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	доцент КЕіП, к.е.н. Тюленєва Ю.В.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка календарного плану		
2	Літературний огляд за темою магістерської дисертації		
3	Визначення критеріїв, які необхідно враховувати при утворенні оксиду азоту		
4	Обрання математичної моделі утворення оксидів азоту при спалюванні органічного палива		
5	Розробка програми для математичного моделювання утворення оксидів азоту при спалюванні органічно палива		
6	Моделювання утворення оксидів азоту у котлі ТПП-210А із використання пакету FIRE 3D		
7	Аналіз отриманих результатів		
8	Розробка стартап-проекту		
9	Написання пояснювальної записки		
10	Підготовка доповіді та створення презентації на захист роботи		
11	Попередній захист магістерської дисертації		

Студент

В.А. Стаднік

Науковий керівник дисертації

Ю.О. Безносик

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить сторінок 97, рисунків 20, таблиці 20, додатків 3, джерел 36.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, КІНЕТИЧНА СХЕМА, ОКСИДИ АЗОТУ, КОТЕЛ, ПАЛИВО, КИСЕНЬ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, СТАРТАП-ПРОЕКТ

Об'єкт дослідження – комп'ютерне моделювання утворення оксидів азоту при спалюванні органічного палива.

Мета дослідження – розробка вдосконаленого пакету прикладних програм і його випробування в чисельних дослідженнях для оцінки технічних рішень в межах зниження шкідливих викидів в котлах.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання, об'єктно-орієнтоване програмування, інтелектуальний аналіз даних.

Теоретичний і розрахунковий аналіз використовуваних в розрахунковій практиці кінетичних схем хімічних реакцій утворення оксидів азоту.

Розробка фізичної та математичної моделі генерації оксидів азоту при спалюванні пилоподібного палива в пальниках котлоагрегатів з урахуванням обраної кінетичної схеми.

Проведення обчислювального експерименту, що дозволяє оцінити вплив технологічних методів зниження утворення оксидів азоту, з виявленням найбільш перспективних рішень для чинного котлоагрегату.

Результати даної роботи можуть бути корисними на етапах проектування та впровадження на ТЕС, а також застосовуватися операторами-технологами під час протікання виробничого процесу.

Актуальність роботи: прогнозування утворення шкідливих речовин при спалюванні палива в котлах ТЕС залишається однією з першорядних і масштабних завдань для теплоенергетики також це питання має глобальне значення для охорони планетарної навколишнього середовища і отже для виживання людства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація Стадніка В. А. виконувалась: в рамках договору про науково-технічне співробітництво між КПІ ім. І. Сікорського та Інститутом технічної теплофізики НАН України, згідно до завдань Ініціативної науково-дослідної роботи кафедри КХТП «Інтелектуальна система для розроблення еко-безпечних процесів знешкодження шкідливих викидів».

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на VII Міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (Київ, 2018), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях» (Київ, 2018).

Публікації. За матеріалами магістерської дисертації опубліковано 1 статтю та 1 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит страниц 97, рисунков 20, таблицы 20, приложений 3, источников 36.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КИНЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА, ОКСИД АЗОТА, КОТЕЛ, ТОПЛИВО, КИСЛОРОД, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, СТАРТАП-ПРОЕКТ

Объект исследования - компьютерное моделирование образования оксидов азота при сжигании органического топлива.

Цель исследования - разработка усовершенствованного пакета прикладных программ и его испытания в многочисленных исследованиях для оценки технических решений в пределах снижения вредных выбросов в котлах.

Методы исследования - компьютерное моделирование, объектно-ориентированное программирование, интеллектуальный анализ данных.

Теоретический и расчетный анализ используемых в расчетной практике кинетических схем химических реакций образования оксидов азота.

Разработка физической и математической модели генерации оксидов азота при сжигании пылевидного топлива в горелках котлоагрегатов с учетом выбранной кинетической схемы.

Проведение вычислительного эксперимента, позволяет оценить влияние технологических методов снижения образования оксидов азота, с выявлением наиболее перспективных решений для действующего котлоагрегата.

Результаты данной работы могут быть полезными на этапах проектирования и внедрения на ТЭС, а также применяться операторами-технологами во время протекания производственного процесса.

Актуальность работы: прогнозирование образования вредных веществ при сжигании топлива в котлах ТЭС остается одной из первостепенных и масштабных задач для теплоэнергетики также этот вопрос имеет глобальное значение для охраны планетарной окружающей среды и, следовательно, для выживания человечества.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Магистерская диссертация Стадника В. А. выполнялась: в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между КПИ им. И. Сикорского и Институтом технической теплофизики НАН Украины, согласно задач Инициативной научно-исследовательской работы кафедры КХТП «Интеллектуальная система для разработки эко-безопасных процессов обезвреживания вредных выбросов».

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы докладывались на VII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по химии и химической технологии (Киев, 2018), VI Международной научно-практической конференции «Компьютерное моделирование в химии и технологиях» (Киев, 2018).

Публикации. По материалам магистерской диссертации опубликовано 1 статью и 1 тезисы докладов в сборниках материалов конференций.

ABSTRACT

The master's dissertation contains pages 97, drawings 20, tables 20, applications 3, sources 36.

MATHEMATICAL MODEL, COMPUTER MODELING, KINETIC SCHEME, NITROGEN OXIDES, BOTTLE, FUEL, OIL, SOFTWARE, STARTAP PROJECT

Object of research - computer modeling of formation of nitrogen oxides at combustion of organic fuel.

The purpose of the study is to develop an improved application package and its testing in numerical studies to evaluate technical solutions for reducing harmful emissions in boilers.

Research methods - computer modeling, object-oriented programming, intelligent data analysis.

Theoretical and computational analysis of the kinetic schemes of chemical reactions of formation of nitrogen oxides used in the computational practice.

Development of physical and mathematical model of generation of nitrogen oxides at combustion of sawblade fuel in burners of boiler units, taking into account the chosen kinetic scheme.

Conducting a computational experiment that allows to evaluate the influence of technological methods of reducing the formation of nitrogen oxides, with the identification of the most promising solutions for a functioning boiler unit.

The results of this work may be useful at the stages of design and implementation at the TPP, as well as used by technology operators in the course of the production process.

The urgency of the work: the prediction of the formation of harmful substances in the combustion of fuel in boilers TPP remains one of the primary and large-scale tasks for heat power engineering, and this issue is of global importance for the protection of the planetary environment and, therefore, for the survival of mankind.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes. Master's thesis Stadnik VA was carried out: within the framework of the agreement on scientific and technical cooperation between the KPI them. I. Sikorsky and the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, in accordance with the tasks of the Initiative research work of the KHTP Department "Intelligent system for the development of eco-safe processes for the elimination of harmful emissions".

Approbation of the results of the dissertation. The main results of the work were reported at the VII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists in Chemistry and Chemical Technology (Kyiv, 2018), VI International Scientific and Practical Conference "Computer Simulation in Chemistry and Technologies" (Kyiv, 2018).

Publications According to the materials of the master's dissertation, 1 article and 1 thesis of reports in the collections of conference materials were published.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН, УТВОРЮЮЧИХСЯ ПРИ ЗГОРАННІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА.....	15
1.1 Газоподібні шкідливі речовини, що утворюються при спалюванні натуральних палив	15
1.2 Генерація оксидів азоту при горінні паливо	16
1.3 Способи придушення оксидів азоту при спалюванні твердого палива ...	19
1.4 Сучасні кінетичні схеми генерації оксидів азоту при горінні пилоподібного палива і їх використання в математичних моделях	24
1.4.1 Схема утворення оксидів азоту за кінетичною моделлю Мітчелла- Тербелла	26
1.4.2 Схема утворення оксидів азоту за кінетичною моделлю Гусева- Зайчика-Кудрявцева.....	28
1.5 Технічний аналіз вугілля марки А.....	29
1.6 Висновки за розділом	30
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	31
2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КІНЕТИЧНИХ СХЕМ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ	32
2.1 Аналіз та математичне моделювання кінетичної схеми утворення оксидів азоту за моделлю Мітчелла-Тербелла.....	33
2.2 Аналіз кінетичної схеми та математичне моделювання утворення оксидів азоту за моделлю Гусева-Зайчика Кудрявцева	35
2.3 Числові методи вирішення систем кінетичних рівнянь.....	36
2.3.1 Аналіз чисельного методу вирішення диференційних рівнянь Рунге- Кутта.....	38
2.3.2 Аналіз чисельного методу вирішення диференційних рівнянь Мерсона.....	39
2.4 Висновки за розділом	40
3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ	41
3.1 Структура обчислювального модуля:	42
3.2 Інструкція користувачу програмного продукту	43
3.3 Аналіз отриманих результатів	46

3.4 Висновки за розділом	49
4 МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ В РОЗРАХУНКОВОМУ ПАКЕТІ FIRE 3D.....	50
4.1 Опис пакету FIRE 3D.....	51
4.2 Характеристика котла ТПП 210А.....	56
4.3 Вихідні данні для розрахунку	57
4.4 Базовий варіант розрахунку теплообміну і аеродинаміки в котлі	60
4.6 Висновки за розділом	63
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	64
5.1 Резюме: конкретизація бізнес-ідеї, мети стартапу, об'єкту дослідження, місця розробки у інноваційному ланцюжку цінності	66
5.2 Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища старт-апу.....	68
5.3 Ключові фактори успіху проекту за методом Шонфільда.	71
5.4 Розрахунок основних техніко-економічних показників проекту	73
5.5 Оцінка ризиків та страхування розробки.	79
5.6 Карта бізнес процесів використання стартап проект	80
5.7 Аналіз ризиків	81
5.8 Висновок за розділом.....	83
ВИСНОВОК.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85
ДОДАТОК А.....	89
ДОДАТОК Б	90
ДОДАТОК В.....	96

ВСТУП

Життєво важливою проблемою сьогодення є захист повітря, що виникає як наслідок недосконалої господарської діяльності людини. Зростання споживання енергії супроводжується збільшенням шкідливих викидів, що забруднюють навколишнє середовище. При цьому не менше 40% від загальної кількості що викидаються в атмосферу оксидів азоту припадає на частку теплових електричних станцій (ТЕС), що працюють на органічному паливі. Утворення оксидів азоту при горінні такого палива призводить до суттєвих порушень природної рівноваги. До основних, постійних джерел забруднення атмосферного повітря, відносяться працюючі на вугіллі ТЕС, які постачають в атмосферу у великих кількостях оксидів азоту (NO і NO_2) і оксидів сірки (SO_2 і SO_3), тверді частинки, а також оксиди вуглецю, альдегіди, органічні кислоти [1].

Частка пилоподібного палива, потрапляючи в топку котла з повітрям через пальниковий пристрій, вступає в процес реагування з зовнішньою поверхнею, а внутрішня маса до деякого часу залишається інертною. Паливно-повітряний струмінь розширюється в топковому об'ємі і захоплює за собою паливні гази високої температури, змішуючись з ними, нагрівається. Нагрівання потоку струменя здійснюється від димових газів і внутрішньої поверхні топки в основному випромінюванням, а також в меншій мірі конвекцією і теплопровідністю при контакті з топковим газами. Вугільний пил знаходиться в стані польоту в топковому об'ємі, проходячи послідовно етапи теплової обробки, супроводжувані сушінням, виходом і горінням летючих речовин, догоранням коксу і виділенням шлакового залишку. Підготовлена в системі пилоприготування вугільний пил складається з частинок різної товщини помелу, внаслідок чого спалахують і згоряють першими дрібніші пилинки. Для великих частинок нагрів і початок горіння дещо затягується. Тому по довжині пиловугільного факела відбувається поєднання окремих стадій горіння різних за розміром частинок. При нагріванні в потоці і сублімації летучих навколо частинки утворюється газовий обсяг [2]. Співвідношення вихідних азотовмісних

газоподібних компонент в складі цих летючих речовин визначається природою палива, оскільки склад органічної маси твердих палив залежить від ступеня вуглефікації. Чим менше ступінь вуглефікації палива, тим менше в ньому вуглецю, і азот палива переходить в газову фазу у вигляді аміаку. Ціаніди HCN і аміак NH_3 в процесі горіння летючих реагують по розгорнутому ланцюговому механізму з утворенням паливного оксиду азоту NO і молекулярного азоту N_2 [1].

Паливний азот, що залишився в коксовому залишку, при догоранням останнього теоретично так само може конвертувати в NO і N_2 . При спалюванні сірчистих палив відбувається відносно зниження емісії оксидів азоту, що пов'язано з більш сильним хімічним спорідненістю сірки до кисню. Сірка в процесі горіння інтенсивно «захоплює» атоми кисню, утворюючи різні оксиди сірки (SO , SO_2 , SO_3), конкуруючи тим самим з процесами окислення паливного і атомарного азоту [3]. Характеристики процесів утворення оксидів азоту в топкових умовах можна визначити як експериментально, так і теоретично. Найповнішу інформацію можна отримати шляхом вимірювань на досліджуваному об'єкті в натуральних умовах спалювання. При проведенні експериментального дослідження в повномасштабній топкової камері котлоагрегату принципово можна визначити викиди NO_x і SO_x в природних умовах. Але в багатьох випадках повномасштабні дослідження дуже дорогі і часто неможливі. Іншою альтернативою можуть послужити експерименти, проведені на маломасштабних установках. Однак в цьому випадку отримані експериментальні дані необхідно переносити на реальний об'єкт, а загальні закономірності для цього, як правило, не існують. Більш того, на маломасштабних установках відтворити всі властивості реального об'єкта не завжди можливо, і це теж знижує достовірність отриманих результатів. І треба завжди мати на увазі, що в багатьох випадках отримання експериментальних даних важко, а вимірювальні прилади можуть давати значні похибки [4].

При чисельному дослідженні визначають результати рішення деякої задачі згідно застосовуваної математичної моделі, а не характеристики дійсного

фізичного процесу. При дослідженні фізичних процесів утворення оксидів азоту при спалюванні вугілля в топках котлів математична модель являє собою систему диференціальних рівнянь. Класичні роботи по теплообміну і гідроаеромеханіці дають підстави для висновку про те, що отримати аналітичні рішення можливо тільки для обмеженої частини що представляють практичний інтерес завдань. Крім того, ці рішення бувають складними самі по собі, оскільки найчастіше містять нескінченні ряди, спеціальні функції і т.д., і їх чисельна оцінка може представляти важке завдання. Однак рівень розвитку чисельних методів чи наявність суперкомп'ютерів дають всі підстави вважати, що для практично будь-яких завдань є принципова можливість складання математичної моделі і виконання її чисельного дослідження. Головне спрощення, яке робить чисельний метод є використання не диференціальних, а алгебраїчних рівнянь [4]. Відомі переваги чисельного рішення в порівнянні з відповідним дослідженнями зводяться до наступних положень[4]:

1. Низька вартість в більшості випадків, а особливо при використанні спеціального програмного забезпечення. Вартість витраченого обчислювальною машинною часу на багато порядків нижче вартості відповідного дослідження, причому значення цього фактору збільшується зі зростанням масштабів і ускладненням досліджуваного фізичного процесу;
2. Оперативність отримання результатів. Чисельне рішення можна провести відносно швидко, так що досвідчений інженер-конструктор має можливість опрацювати кілька варіантів розглянутої проблеми і вибрати оптимальну конструкцію, в той час як відповідне по інформативності експериментальне дослідження тривало б багаторазово довше;
3. Чисельне рішення дає можливість отримати повну інформацію, з її допомогою можна знайти значення всіх змінних в топковому обсязі, таких як швидкість, тиск, температура середовища, концентрація оксидів, інтенсивність турбулентності. При цьому для розрахунку доступний весь

досліджуваний об'єм і відсутні похибки фізичної картини, що вносяться датчиками при дослідженні;

4. Можливість моделювання як реальних, так і при необхідності ідеальних умов протікання процесу.

Проте, при всіх визнаних перевагах чисельне рішення отримує у вигляді результату кількісні закономірності, властиві лише даної математичної моделі. На противагу цьому за допомогою дослідження можна фіксувати саму дійсність. Таким чином, користь від чисельного розрахунку топкової камери обмежена обґрунтованістю математичної моделі, хоча результат залежить не тільки від математичної моделі, а й від методу чисельного моделювання. Інакше кажучи, якщо застосовується математична модель, яка погано моделює досліджуване явище, то за допомогою навіть дуже хорошого чисельного методу можна отримати ненадійні і навіть негідні результати [1,4].

Також до недоліків чисельного рішення відносяться: зростання похибки округлення, проблема завдання граничних умов, вартість обчислювальної техніки. Однак, незважаючи на всі недоліки, чисельне моделювання є одним з основних методів дослідження оточуючих нас процесів і явищ. У свою чергу, прогнозування досліджуваних процесів аеродинаміки, теплообміну, теплоенергетичних процесах тощо, є в даний час важливим фактором розвитку обчислювальних методів.

Викладене вище пояснює актуальність дослідження утворення оксидів азоту в топках пиловугільних котлів засобами чисельного моделювання.

По-перше, прогнозування утворення шкідливих речовин при спалюванні палива в котлах ТЕС залишається однією з першорядних і масштабних завдань для теплоенергетики, оскільки нетехнологічне зниження викидів шкідливих речовин при великих обсягах призводить до істотного подорожчання продукції.

По-друге, це питання має глобальне значення для охорони планетарного навколишнього середовища і отже для виживання людства.

Хоча в цьому напрямку виконано чимало робіт, але залишається потреба в удосконаленні та розвитку розрахункових методик утворення шкідливих

викидів. Перш за все, це відноситься до процесів генерації оксидів азоту в умовах спалювання палива, для розрахункової оцінки яких важливе значення мають кінетичні моделі. Однак саме питання вибору і використання хімічних кінетичних схем, їх значимості для попередньої оцінки утворення оксидів азоту стосовно чисельного моделювання в додатку до дослідження реальних технологій паливо спалювання потребують подальшого опрацювання.

В роботі розглянуто процес утворення оксидів азоту при згоранні органічного палива, використання різні кінетичні та математичні моделі для реалізації поставленої задачі. Визначені критерії, які необхідно враховувати при використанні органічного палива в пилувугільних котлах.

Об'єкт дослідження – комп'ютерно-інтегровані технології аналізу процесу утворення оксидів азоту при спалюванні органічного палива.

Мета дослідження – розвиток математичної моделі процесу утворення оксидів азоту стосовно пилувугільним котлів на основі аналізу кінетичних схем генерації NO_x , розробка вдосконаленого пакету прикладних програм і його випробування в численних дослідженнях для оцінки технічних рішень в межах зниження шкідливих викидів в котлах.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання, об'єктно-орієнтоване програмування, інтелектуальний аналіз даних.

Теоретичний і розрахунковий аналіз використовуваних в розрахунковій практиці кінетичних схем хімічних реакцій утворення оксидів азоту;

Розробка фізичної та математичної моделі генерації оксидів азоту при спалюванні пилоподібного палива в топках котлоагрегатів з урахуванням обраної кінетичної схеми;

Проведення обчислювального експерименту, що дозволяє оцінити вплив технологічних методів зниження утворення оксидів азоту (Зміна надлишку повітря, організація ступеневої спалювання тощо), з виявленням найбільш перспективних рішень для чинного котлоагрегату.

Результати даної роботи можуть бути корисними на етапах проектування та впровадження на ТЕС, а також застосовуватися операторами-технологами під час протікання виробничого процесу.

За результатами магістерської дисертації були опубліковані наступні роботи:

- Стаднік В. А., Безносик Ю. О. Математичне моделювання викидів оксидів азоту при згоранні органічного палива. // VII Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології, 11-13 квітня 2018 – Збірка тез доповідей учасників – Київ, 2018. – с. 200.
- Стаднік В. А., Безносик Ю. О. Моделювання утворення оксидів азоту при згоранні органічного палива. Шоста міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ2018», Київ 16-18 травня 2018 року. Збірник наукових статей. – Київ, 2018. – с. 234-237.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН, УТВОРЮЮЧИХСЯ ПРИ ЗГОРАННІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

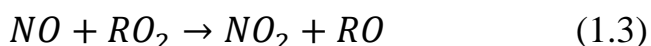
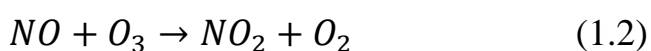
1.1 Газоподібні шкідливі речовини, що утворюються при спалюванні натуральних палив

Оксиди азоту містяться в атмосфері в значно менших кількостях, ніж молекулярний азот (79% від атмосферного повітря), але незважаючи на це, їх вплив на життя людини і біосферу в цілому дуже значимо.

Оксиди азоту поділяють на групи за ступенем окислення азоту. У міру збільшення валентності утворюються геміоксид N_2O , монооксид NO , азотистий ангідрид N_2O_3 , діоксид NO_2 , тетраоксид N_2O_4 і азотний ангідрид N_2O_5 . Для охорони навколишнього середовища велике значення мають моно- і діоксид азоту, суму яких позначають як NO_x . Інші оксиди азоту не є настільки важливими з цієї точки зору, або їх присутність в атмосферному повітрі дуже мало через нестійкість [9-11].

В даний час в українських директивних документах з охорони навколишнього середовища припускають повний перехід NO в NO_2 в атмосфері, що, звичайно, призводить до завищення розрахункової загазованості повітря по порівнянню з фактичною. Таке рішення прийнято кілька десятиліть тому в зв'язку з неможливістю розраховувати частку переходу NO в NO_2 [8]. Дослідження, проведені в 70-х роках радянськими (А.К. Внуков, І.Я. Сігал і ін.) і зарубіжними (Бейлке, Елшоут) вченими, дозволили оцінити з достатньою точністю ступінь переходу NO в NO_2 в залежності від деяких атмосферних параметрів.

Окислення NO в NO_2 може протікати за трьома реакцій [1]:



Реакція (1.1) грає роль тільки при достатніх високих концентраціях NO , швидкість її зменшується в міру зниженні концентрації NO і швидкість

становиться несуттєвою. Ще менше роль відіграє реакція (1.3): перетворення оксиду азоту в діоксид за допомогою пероксидного радикала має значення лише тоді, коли високі концентрації вуглеводневих радикалів і інтенсивність ультрафіолетового опромінення. Найбільше значення має реакція (1.2) окислення NO озоном [8].

1.2 Генерація оксидів азоту при горінні паливо

Процеси утворення оксидів азоту при горінні вивчені не повною мірою і вимагають подальшої детального опрацювання складної кінетики хімічного процесу зі спільним вивченням тепломасообміну і його впливу на кінетичну картину процесу в цілому. У другій половині XX століття (60-70 рр.) За основу публікацій в СРСР і за кордоном утворення NO прийнята схема, розроблено Я.Б. Зельдовичем [12], згідно з якою вихід оксидів азоту визначається реакцією між атомом кисню і молекулярна азотом, а утворення атомарного кисню - дисоціацією молекули O_2 . Ці процеси мають високий енергетичний Потенціал ($E = 561$ кДж / моль) і визначаються температурою процесу. Однак досліді показували [12, 13], що:

- Утворення NO в факелі відбувається в зоні горіння и залежить від багатьох хімічних реакцій, при цьому процес утворення NO_x протікає не тільки при реакції атомарного кисню з молекулами азоту, а й в других реакціях;
- Утворення O в факелі відбувається як за рахунок дисоціації O_2 , так і в інших реакціях;
- Максимальна температура в ядрі горіння менше розрахункової теоретичної через концентрацій проміжних продуктів реакцій и теплообміну;
- Вплив температури на вихід NO значно менше, ніж передбачалося раніше.

Виходячи з результатів досліджень [12, 13], можна виділити три основні групи утворення оксидів азоту при горінні органічного палива: термічні, «швидкі» і паливні NO.

Термічні оксиди азоту виникають тільки при високих температурах. Процес відбувається по реакціях окислення молекулярного азоту, для яких Я.Б. Зельдовичем розроблений ланцюговий механізм, в якому активними центрами є атомарний азот і атомарний кисень [1, 12, 14]. Цикл ланцюгового механізму по Я.Б. Зельдовича складається з наступних взаємодій:

- ініціює імпульс - $M + O_2 = M + 2O$ (ендоефект 494 кДж / моль);
- ендотермічна розвиток - $N_2 + O' = N + NO$ (ендоефект 314 кДж / моль);
- екзотермічне розвиток - $N' + O_2 = O + NO$ (екзоефект 134 кДж / моль);
- обрив - $2O + M = O_2 + M$ (екзоефект 494 кДж / моль).

Залежність концентрації оксидів азоту від концентрації атомарного кисню є лінійною, а від температури - експоненційною [1, 13, 14]. Тому головними факторами утворення термічних NO_x виступають максимальна температура (T_{max}) і час реакції (τ), яке характеризує темп охолодження в зоні високих температур:

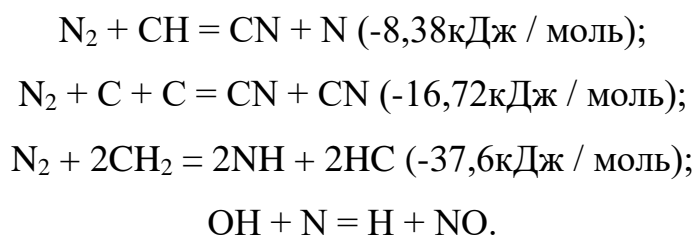
$$NO_x^{терм} = f_1(T_{max}, \tau) = f_2\left(T_{max}, \frac{dT}{d\tau}\right)$$

Для топок великих розмірів характерно більш повільне охолодження продуктів згоряння і збільшений період реакції утворення оксиду азоту в порівнянні з менш габаритними топковими камерами.

Найбільш повний аналіз рівнянь, що моделюють процеси, що протікають в зоні горіння і що роблять вплив на утворення NO в полум'ї, міститься в роботі [2].

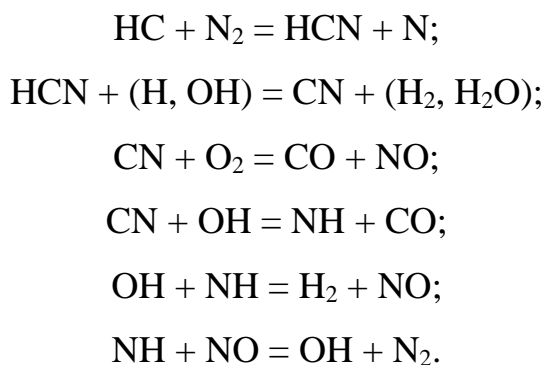
«Швидкі» оксиди азоту утворюються при контакті проміжних вуглеводневих сполук палива з вступником в пальники повітрям (молекулярним азотом) на початковій ділянці зони горіння факела при температурах понад 1000 К. Свою назву вони отримали в зв'язку з тим, що в вуглеводневих еквівалентах безпосередньо в зоні горіння фіксується чималі концентрації NO, хоча час

горіння на порядок менше, ніж період часу, необхідний для отримання рівноважних концентрацій NO навіть при горінні метано-повітряної суміші стехіометричного складу [6, 15]. С. Фенімор [16] на підставі аналізу ряду реакцій запропонував пояснення цього експериментального факту. Занадто швидке утворення NO він пояснив тим, що молекули азоту зв'язуються радикалами типу CH і CH₂, вступаючи в реакції з дуже маленькими енергетичними затратами. До таких реакцій С. Фенімором [16] були віднесені:



Виміряні згодом концентрації HCN в зонах факела підтверджують можливість утворення деякої кількості NO з участю реакцій, які протікають досить помітно навіть при 1600 К, коли термічні оксиди азоту практично не утворюються.

Р. Гарріс з співавторами [17], вивчаючи горіння суміші CH₄-O₂-N₂ при варіюванні концентрації O₂ від 33,3 до 80%, близько області горіння завжди виявляв дуже рівноважні концентрації OH. Це дало їм основу для пояснення утворення NO в зоні горіння за наступною схемою реагування:



Паливні NO_x утворюються при продуванні палива гарячим повітрям при температурі газового середовища 800-2100 К. Утворення паливних NO_x слабо залежить від температури, особливо в діапазоні температур понад 1200 К, і відбувається на початковій ділянці факела (за часом і простором між утворенням «швидких» і термічних оксидів NO)[1, 14].

Роботи С. Фенімора [16] і деякі інші, проведені в США, а також дослідження В.І. Бабія і співробітників [18] в Росії показали, що джерелом утворення частини оксидів азоту, що надходять в атмосферне повітря з димовими газами, є азот, що міститься в складі палив.

1.3 Способи придушення оксидів азоту при спалюванні твердого палива

Процеси утворення NO_x , описані вище, показують, що при утворенні паливних NO_x важливим фактором є концентрація кисню в зоні горіння летючих, а температура процесу відіграє другорядну роль. Для термічних оксидів азоту температурний рівень є основним показником інтенсивності утворення NO_x , а й концентрація окиснювача має чимале значення. Ця обставина визначило основні напрямки боротьби технологічними методами з викидами азоту для котлів, що працюють на твердому паливі: зниження максимальної температури і зниження концентрації окислювача [1,2].

З урахуванням цього і наявного досвіду виявилось можливим сформулювати заходи зниження утворення термічних оксидів NO в практичних умовах шляхом зниження швидкості реакції їх генерації [1,2, 6-8, 19]. Зокрема, до досить використовуваних з них відносяться нижченаведені. Дуже поширене зниження загального рівня температур в топці шляхом введення в топковий обсяг охолоджуючого агента, в якості використовують рециркуляцію газу з температурою не більше 400 ° С, пари або води безпосередньо в зону горіння або подаючи в паливних повітря. Для зниження локальних температур в топці досягають шляхом цілеспрямованої подачі тих же охолоджуючих агентів в зони максимальних температур: воду або пар впорскують в окремі зони факела, гази

рециркуляції посилено вводять в частини факела або в центральні пальники. Для зменшення максимальних температур і одночасно зниження концентрації кисню в зоні їх розвитку використовують організацію ступеневого горіння, а також зниження загального коефіцієнта надлишку повітря. Але зміна загального коефіцієнта надлишку повітря можна вести тільки до деяких меж, які обмежені умовами початку стрімкого збільшення виходу газоподібних продуктів неповного реагування (C , CO , C_mH_n).

Як зазначено, найбільш поширеним і добре вивченим методом зниження виходу оксидів азоту є рециркуляція димових газів в зону горіння. Поряд з додатковими перевагами, до яких відносяться захист екранів від перегріву і можливість регулювання перегріву пара, застосування рециркуляції має ряд недоліків. Зокрема, введення рециркулюючих газів в топку призводить до деякого зменшення ККД котла і викликає підвищений опір газоповітряного тракту [2].

До способів, заснованих на зниженні концентрації окиснювача, відносяться нестехіометричне спалювання, ступеневе спалювання, застосування низько емісійних пальників спеціальних конструкцій і т.п. Зменшення надлишку повітря в топці для всіх видів палива призводить до зниження викидів оксидів азоту. Багаторазові дослідження на котлах підтвердили, що зниження надлишку повітря в топці (за інших рівних умов) призводить до зменшення концентрації NO_x в димових газах, однак ефективність цього методу в різних випадках виходить різною [1]. Застосування цього методу обмежується поряд з появою в димових газах продуктів неповного горіння (CO , H_2), також збільшенням вмісту горючих, зростанням інтенсивності забруднення поверхонь нагріву і високотемпературної корозії екранів [6, 8].

Організація двоступеневого або двухстадійного (а також трьох- і многостадійного) спалювання палива є перспективним методом зменшення концентрації оксидів азоту в димових газах і одночасного регулювання топкового режиму. При двухступеновому спалюванні через пальники подають паливно-повітряну суміш з недоліком окиснювача так, щоб окиснювача було

недостатньо для генерації NO_x , а в кінцеву зону процесу з більш низькою температурою горіння вводять відсутній для повного згорання кисень. Різновид ступеневої спалювання із ступінчастою подачею палива і відновленням NO_x в топці є ефективним методом боротьби з оксидами азоту [6, 20]. Сутність методу полягає в тому, що в топку вище пальників подається аеросуміш з нестачею повітря. В результаті цього утворюються продукти згорання, які грають роль газів - відновників. Взаємодія цих газів з оксидами азоту, що виникають в факелі пальників, розташованих нижче, відновлює NO з утворенням нешкідливого молекулярного азоту N_2 . В сопла гострого дуття, які розташовані над стоками пальника, подається повітря для допалювання газоподібних продуктів неповного горіння. При такій організації топкового процесу обсяг топки по висоті можна умовно розділити на наступні зони: горіння палива, вторинного горіння і відновлення оксидів азоту, догорання продуктів горіння з другої зони [1].

Термічна обробка палива до подачі його в топку як елемент технології паливоспалювання дає позитивний результат за рахунок попереднього виділення частини летючих речовин. Це пояснюється тим, що підігрів вугільного пилу призводить до руйнування азотовмісних компонентів палива і їх виходу в вигляді азотистих радикалів разом з летючими. Якщо цей процес проводити в відновному середовищі, то нестійкі радикали типу HCN і NH_3 переходять не в оксид азоту, а в молекулярний азот [21]. За експериментальними даними, цим методом можна знизити викид NO_x в 2 - 2,5 рази [1].

Застосовуються також методи хімічної очистки газів від оксидів азоту, які поділяють на такі групи [2]: окислювальні, відновлювальні та сорбційні. Окислювальні методи засновані на окисленні оксиду з подальшим поглинанням утвореного діоксиду різними поглиначами. Відновлювальні методи базуються на каталітичному відновленні оксиду азоту до молекулярного азоту і кисню. Сорбційні методи полягають в поглинанні оксидів азоту різними сорбентами. Для очищення димових газів котлоагрегатів найбільш перспективним вважається застосування відновлювальних методів, найбільш вивчений і випробуваний з яких полягає в відновленні оксидів азоту по реакції з аміаком [6].

Способи організації спалювання вугілля в топкових пристроях, як і їх конструкція і розміри, істотно впливають на умови охолодження факела, тому впливають на час протікання реакції утворення оксидів азоту [22, 23].

Сучасні вітчизняні котли обладнуються в основному топковими пристроями трьох конструктивних профілів [22]: відкриті камерні, з пережимом, з циклонними топками (рис. 1.1-1.2).

Найбільш поширеним типом топкового пристрою є відкриті топки, обладнані вихровими пальниками. дещо рідше застосовуються відкриті топки з тангенціальним розташуванням прямоточних пальників, хоча при цьому компонованні пальників поєднання з розтягнутим фронтом горіння дозволяло отримати менший рівень утворення оксиду азоту і більш слабку залежність виходу оксидів азоту від надлишку повітря в топці.

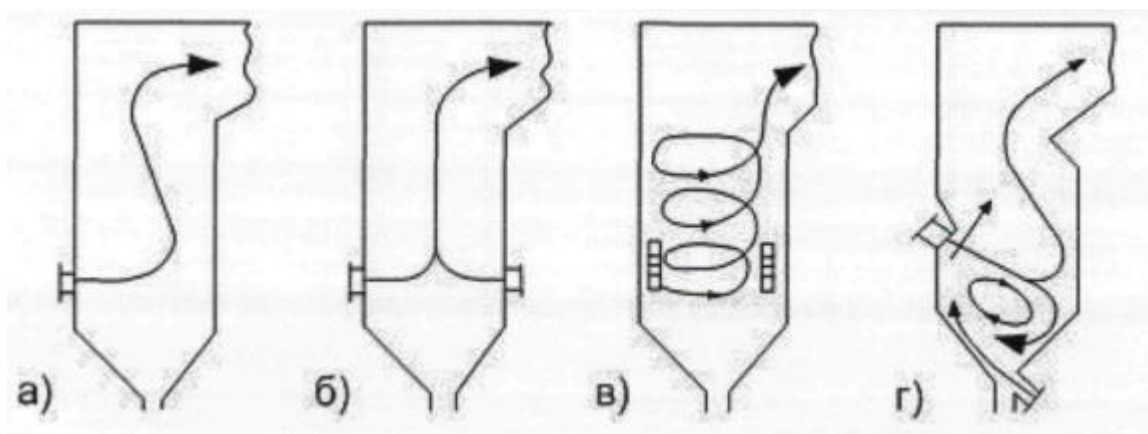


Рисунок 1.1 – Профілі котлів з твердим шлаковидаленням і траєкторією руху в цих факелах:

а – прямоточний S-подібний факел; б – зустрічно-прямоточний факел; в – вертикально-вихровий факел; г – поєднання прямоточного і горизонтально-вихрового факелів

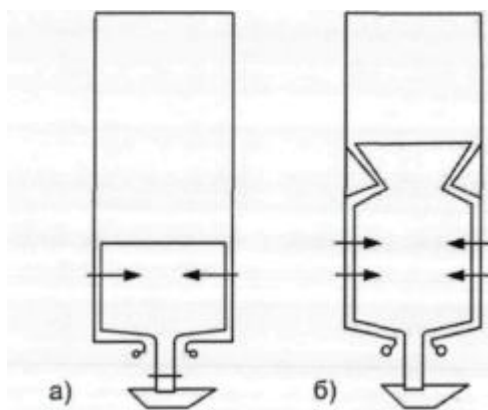


Рисунок 1.2 – Профілі топкових камер, з рідким шлаковидаленням:

а – відкрита топка; б – напіввідкрита топка (з пережимом)

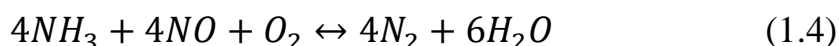
Це пояснюється, в першу чергу, підмішуванням продуктів згоряння до кореню факелів сусідніх пальників. Однак, дана властивість не завжди відтворюється в інших за габаритами, але аналогічних за організації факела топкових пристроях. У загальному випадку збільшенням тепловіддачі до стінок камери згоряння утворення оксиду азоту знижується в більшій мірі в рази застосування прямоточних пальників. А це пояснюється, мабуть, більшою лінійною протяжністю зони горіння и зони утворення оксидів азоту в прямоточному факелі.

Зі збільшенням продуктивності і габаритів камери згоряння, вихід оксидів азоту збільшується. тому завдання створення топкової камери великої теплової потужності і з малим виходом оксиду NO_x вирішується простіше за все шляхом застосування секційних топок, коли є факел малих розмірів, від яких забезпечується ефективний тепловідвід [2].

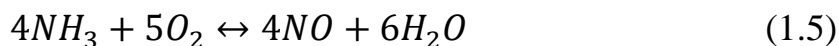
1.4 Сучасні кінетичні схеми генерації оксидів азоту при горінні пилоподібного палива і їх використання в математичних моделях

Розробка нових перспективних методів зниження утворення оксидів азоту в топкових процесах і апробація вже відомих не можлива без залучення детальної інформації про хімічних перетвореннях, які протікають в камерах згоряння. При цьому необхідну основу, узагальнюючу дану інформацію, які можуть дати цю інформацію тільки активно розробляються в даний час, а саме методи чисельного моделювання [25, 26].

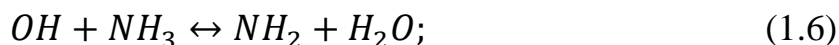
Утворення шкідливих речовин і зменшення їх викиду моделюють з допомогою реакційно-кінетичних моделей і моделі горіння вугільного пилу. Перші моделі справедливі для широкого діапазону температур і концентрацій. Але таке моделювання вимагає великих обчислювальних витрат, так як в порівнянні з моделлю горіння вугільного пилу в цій моделі є нестійкі проміжні продукти. Так, наприклад, потрійна суміш речовин (аміак, оксид азоту, кисень) реагує один з одним в певному температурному діапазоні. До температури приблизно 1300 К в якості продуктів реакції переважають азот і водяна пара концентрація оксиду азоту зменшується. Це можна записати у вигляді реакції [2]:



При високій температурі (вище 1300K) або при високому вмісті кисню можуть відбутися небажані реакції окислення до окису азоту:



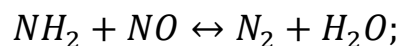
Ці рівняння (1.4) і (1.5) описують інтегральні реакції переходу вихідних речовин до стійким кінцевим продуктам без розгляду проміжних реакцій, в яких беруть участь насамперед вільні радикали, такі як, наприклад, OH, H або O. Дійсно, відновлення оксидів азоту є, в основному, результатом реакції оксиду азоту з радикалами аміну. Радикали аміну утворюються в результаті реакції радикалів OH, O, H з аміаком:



Реакції (1.6) - (1.8) мають сильну температурну залежність. Нижче температури 1100 К відбувається зменшення вмісту оксидів азоту згідно реакції (1.4). З підвищенням температури домінують реакції, в яких радикал аміну взаємодіє з NH і HNO, що веде до утворенню оксиду азоту, наприклад:



Подальше підвищення температури перешкоджає утворенню радикала аміну, і при температурі вище 1540 К аміак повністю перетворюється в оксид азоту. Для продуктів елементарних реакцій згідно рівняння (1.9) можливі різні шляхи:

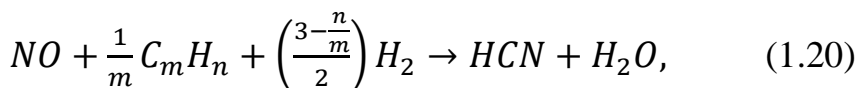
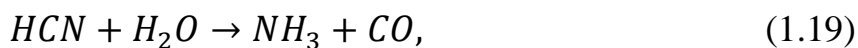
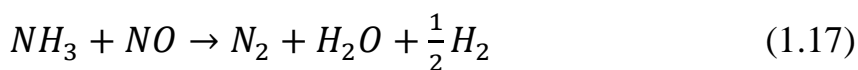
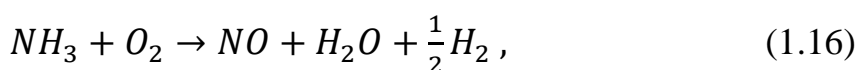
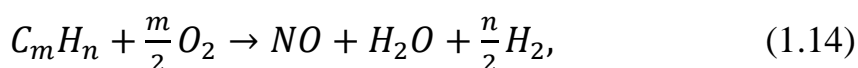
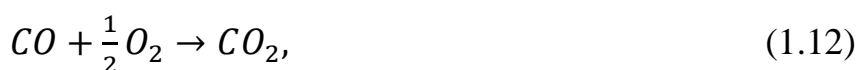


З вищевикладеного випливає, що основною проблемою при моделюванні процесу окислення азоту є не стільки бра кінетичних даних для необхідного температурного діапазону, скільки вибір схем взаємодії компонентів і проміжних продуктів. В літературі є кілька кінетичних схем [1-3, 27-28], які представлені в наведеному нижче огляді. Критеріями вибору з них схеми для моделі є достатня точність відтворення експериментальних даних розрахунками, оптимальне число реакцій і кількість компонентів.

1.4.1 Схеми утворення оксидів азоту за кінетичною моделлю Мітчелла-Тербелла

Модель генерації NO при спалюванні пилоподібного палива, в основі якої лежить кінетичний механізм, що включає 12 узагальнених сумарних хімічних реакцій, запропонована Дж. В. Мітчеллом і Дж. М. Тербеллом [27]. Вона відтворює складний процес перетворення азотовмісних речовин палива в NO під час процесу горіння.

Значні сумарні реакції, які беруть участь в генерації NO_x при згорянні пилоподібного палива (рис. 1.6), враховують процеси піролізу вугілля, гетерогенного горіння коксового залишку, утворення паливних, «швидких» і термічних NO_x. Стехіометрія сумарних реакцій, включених в кінетичну модель, наведена нижче [27]:



де S - твердий, VM - летючий.

Піроліз вугілля описується реакціями (1.13) і (1.15), а горіння коксу реакцією (1.10). Горіння вуглеводнів, які вийшли з летючими речовинами під час газифікації вугілля, враховується реакцією (1.14). Реакція (1.18) являє механізм утворення термічних NO_x , а генерація паливних і «швидких» NO_x описується реакціями (1.11), (1.16), (1.17) і (1.19) - (1.22).

Слідуючи цій схемі (рис. 1.3), процес утворення оксидів азоту можна представити таким чином. При швидкому нагріванні частинки вугілля відбувається її термічний розклад (піроліз), в результаті якого має місце вихід летючих компонентів і азоту палива. При цьому частина пов'язаного азоту палива (70-80% від загальної кількості) [27] відразу перетвориться в газову фазу у вигляді ціанідів (напрямок реагування 1, рис. 1.3). Потім відбувається газофазне горіння вуглеводневих компонент летючих і гетерогенне горіння коксового залишку. Залишковий азот (20-30% від загальної кількості азоту палива), розподілений по частці коксу рівномірно, перетворюється в NO зі швидкістю, еквівалентної швидкості догорання коксової частки (напрямок реагування 2). Утворені при виході летючих речовин ціаніди перетворюються (напрямок реагування 3) в аміни, які, вступаючи в реакцію з киснем O_2 (напрямок реагування 4) або з монооксидом азоту NO (напрямок реагування 5), можуть сприяти або генерації оксидів азоту, або відновленню N_2 з NO.

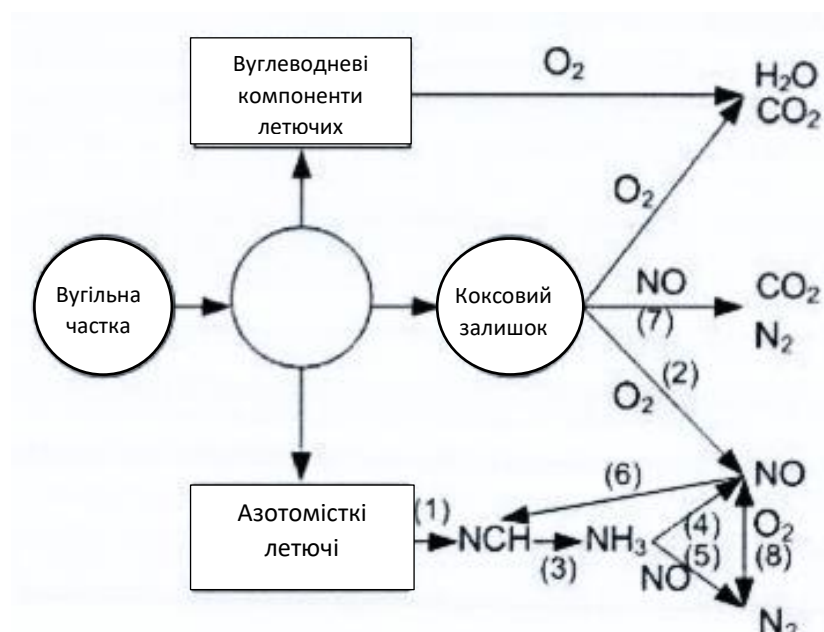


Рисунок 1.3 – Схема сумарного кінетичного механізму горіння вугільної частинки і утворення оксидів азоту (за моделлю Дж. В. Мітчелла і Дж. М. Тербелла) [27]

Важливим взаємодією з точки зору конверсії оксидів азоту є реакції утворення HCN в результаті взаємодії вуглеводнів з NO (напрямок реагування 6) і гетерогенна реакція між NO і часткою коксу (напрямок реагування 7) [27].

1.4.2 Схема утворення оксидів азоту за кінетичною моделлю Гусєва-Зайчика-Кудрявцева

І.М. Гусєв, Л.І. Зайчик і Н.Ю. Кудрявцев [28] запропонували вважати, що всі паливні оксиди азоту генеруються з азоту палива, перетворені разом з летючими речовинами в газоподібну фазу. При цьому азот, що залишився в коксовій частці, не враховується. Утворення паливних NO відбувається і враховується одночасно з виходом і горінням летючих речовин під час розкладання азотовмісних з'єднань палива. Продуктами розкладання останніх є або активний атомарний азот N або ціанід водню HCN . потім процес розвивається двома шляхами. Перший з них - окислення азоту або ціанідів з

утворенням оксиду азоту за схемою: $\text{N (HCN)} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}$. Другий шлях приводить до рекомбінації атомарного азоту $2\text{N} \rightarrow \text{N}_2$ з утворенням молекулярного азоту або той же самий результат дає відновлення оксиду азоту за схемою (рис. 1.4):

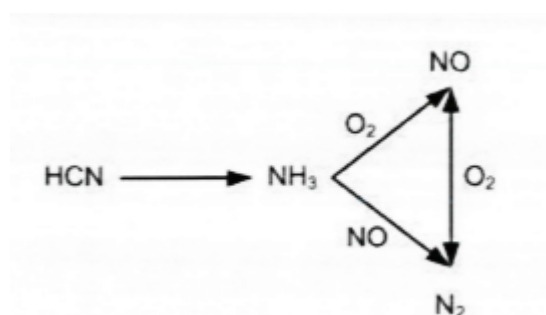
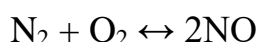


Рисунок 1.4 – Основний фрагмент схеми утворення NO (за моделлю І.Н.Гусева, Л.І. Зайчика і Н.Ю. Кудрявцева) [28]

1.5 Технічний аналіз вугілля марки А.

Тверде паливо почало формуватися декілька мільйонів років назад. Антрацит являється самим найстарішим вугіллям найбільшої степені вуглефікації [14].

Кращий сорт кам'яного вугілля, відрізняється чорним кольором, сильним металевим блиском, великою теплотворною здатністю.

Від інших видів вугілля антрацит відрізняється високою питомою теплотою згоряння, низьким вмістом вологи, високим вмістом зв'язаного вуглецю, азоту, сірки, летючих речовин. Антрацит горить швидко, без диму і полум'я, з високою тепловіддачею, що не спікається. Володіє високою щільністю

органічної маси (1500-1700 кг / м³) та високу електропровідність. Твердість за мінералогічною шкалою 2,0-2,4.

Для математичного моделювання було відібрано вугілля марки А, Донецького басейну, яке видобувається в місті Антрацит, Луганської області. У таблиці 1.1 наведено результати технічного аналізу:

Таблиця 1.1 – Технічний аналіз вугілля марки А

Назва	Позначення	Склад, %
Вуглець	C ^{daf}	92,5
Водню	H ^{daf}	1,97
Кисню	O ^{daf}	2,58
Азоту	N ^{daf}	0,79
Сірки	S ^{daf}	2,14
Вихід летючих	V ^r	4
Зольність вугілля	A ^r	19,5
Вміст води у вугіллі	W ^r	7,5

1.6 Висновки за розділом

Як показано вище, монооксид вуглецю CO та діоксид сірки SO₂ по масі забруднюючої атмосфери речовин домінують серед основних газових забруднень повітряного басейну. Незважаючи на це, оксиди азоту займають серед них особливу місце у зв'язку з високою токсичністю. Навіть короткочасне дію монооксиду азоту NO у малих концентраціях є згубним для здоров'я людини. В атмосфері окису, виділяється разом з іншими продуктами спалювання палива, поступово доокислюється до NO₂, який «запускає» фотохімічні реакції утворення смогу і разом з іншими газоподібними викидами приводить до кислотних опадів і парникового ефекту. Враховуючи комплексний характер шкідливого впливу оксидів азоту на навколишнє середовище, саме процеси їх утворення визначаються в даній роботі в якості предмета дослідження.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для розкриття теми дисертації було поставлено наступні задачі:

1. Теоретичний і розрахунковий аналіз використаних в розрахунковій практиці кінетичних схем хімічних реакцій утворення оксидів азоту;
2. Розробка математичної моделі генерації оксидів азоту при спалюванні пилоподібного палива;
3. Розробка програми для математичного моделювання процесу утворення оксидів азоту при спалювання органічного палива;
4. Моделювання утворення оксидів азоту у котлі ТПП-210а з використання спеціалізованого пакету;
5. Розробка стартап-проекту, що до використання технології зменшення викидів оксиду азоту при спалюванні органічного палива.

2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КІНЕТИЧНИХ СХЕМ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ

Утворення шкідливих речовин моделюються за допомогою реакційно-кінетичних моделей і моделей спалювання вугільного пилу. Критеріями вибору кінетичної схеми являється оптимальне число реакцій компонентів, що беруть участь. Всі розглянуті моделі ґрунтуються на спрощеній схемі утворення оксидів азоту по трикутнику Де Соїте (рис. 2.1) [34].

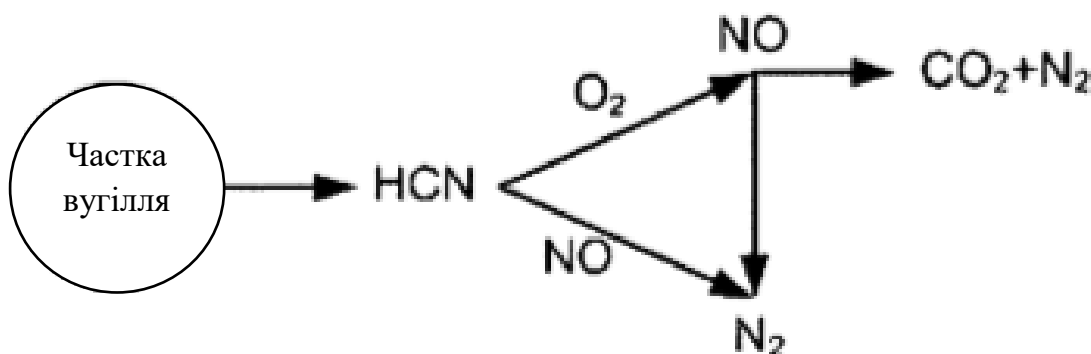


Рисунок 2.1 – Схема утворення оксидів азоту по трикутнику Де Соїте

Для проведення чисельних досліджень з метою аналізу генерації оксидів азоту при горінні пилоподібного палива в топкових пристроях котлів слід використовувати скорочені кінетичні схеми, але ті, що забезпечують передбачення концентрації NO в камері горіння з потрібною точністю. Для цього крім кінетичної схеми модель утворення оксидів азоту при горінні в факелі пилоподібного палива повинна мати інформацію про перебіг процесів виходу і горіння летючих речовин палива. Цим умовам задовольняють і для подальшого чисельного аналізу приймаються наступні моделі: Дж. В. Мітчелла і Дж. М. Тербелла [28], І.Н.Гусева, Л.І.Зайчіка і Н.Ю.Кудрявцева [29].

2.1 Аналіз та математичне моделювання кінетичної схеми утворення оксидів азоту за моделю Мітчелла-Тербелла

В моделі Мітчелла і Тербелла [28] найбільш важливі сумарні хімічні реакції які беруть участь в утворенні NO_x при спалюванні вугілля [14]. Вони враховують піроліз вугілля, гомогене горіння вуглеводнів, гетерогене горіння коксу, утворення паливних і термічних NO_x . Дотримуючись схеми (Рис. 1.3), зображеної в пункті 1.4.1, процес утворення оксидів азоту можна представити наступним шляхом. При швидкому нагріві частки вугілля відбувається її термічне розкладання (піроліз), в результаті якого має місце вихід летючих компонентів вугілля, в тому числі вуглеводневих і азоту. При цьому частина зв'язаного азоту палива (до 70-80%) миттєво (1.15) переходить в газову фазу в виді ціанідів. Після відбувається газове спалювання вуглеводневих компонентів летючих і гетерогене спалювання коксового залишку. Залишки азоту (20-30%), рівномірно розподіляється по частці коксу, окислюється прямо в NO зі швидкістю, пропорційною швидкості догорання коксового залишку (1.11). Ціаніди, утворені при виході летючих, переходять (1.19) в аміни, які, реагують з O_2 (1.16) або NO (1.17), можуть сприяти утворенню оксидів азоту, або відновленню N_2 з NO . Крім цього, важливою з точки зору конверсії оксидів азоту являються реакції утворення HCN в результаті взаємодії з NO (1.20) і гетерогеної реакції між NO і часток коксу (1.21).

Для моделі утворення оксидів азоту достатньо визначити значення швидкості хімічної реакції, відповідальних за зміну концентрації таких компонентів, NH_3 , HCN , NO , O_2 , коксу.

В цьому випадку утворення оксидів азоту з урахуванням схему описується наступною системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned}
\frac{dC_{HCN}}{dt} &= \frac{M_{HCN}}{M_N} \frac{N_p}{V^p} - k_1 e^{-\left(\frac{E_1}{T_g}\right)} \frac{M_{HCN}}{M_{O_2}} C_{HCN} C_{O_2} + \frac{M_{HCN}}{M_{NO}} * k_5 C_{NO} \\
\frac{dC_{NO}}{dt} &= \frac{M_{NO}}{M_N} \frac{N_p}{1-V^p} + \frac{M_{NO}}{M_{NH_3}} * \frac{k_2 * e^{-\left(\frac{E_2}{T_g}\right)} C_{NH_3} C_{O_2} M_{NH_3}}{M_{O_2} \left(1 + k_3 e^{\left(\frac{E_3}{T_g}\right)} C_{O_2} \frac{M_{NH_3}}{M_{O_2}}\right)} - \\
&\quad - \frac{M_{NO}}{M_{NH_3}} * k_4 e^{-\left(\frac{E_4}{T_g}\right)} \frac{M_{NH_3}}{M_{NO}} C_{NH_3} C_{NO} + 2 * k_7 * e^{-\left(\frac{E_7}{T_g}\right)} * \\
&\quad * M_{NO} \left(k_8 * e^{-\left(\frac{E_8}{T_g}\right)} \left(\frac{C_{O_2}}{M_{NO} M_{O_2}} \right)^{0.5} \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} / \left(1 + \frac{k_8 * e^{-\left(\frac{E_8}{T_g}\right)} * C_{NO} M_{O_2}}{k_9 * T_g * e^{-\left(\frac{E_9}{T_g}\right)} * C_{O_2} M_{NO}} \right) - \right. \\
&\quad \left. - \frac{k_{10} * k_{11} * T_g * e^{-\left(\frac{E_{11}}{T_g}\right)}}{k_9 * T_g * e^{-\left(\frac{E_9}{T_g}\right)} * \left(\frac{M_{O_2}}{M_{NO}} * C_{O_2} \right)^{0.5} * \left(\frac{C_{NO}}{M_{NO}} \right)^2} / \left(1 + \frac{k_{10} C_{NO} M_{O_2}}{k_9 * T_g * e^{-\left(\frac{E_9}{T_g}\right)} C_{O_2} M_{NO}} \right) - \right. \\
&\quad \left. - k_5 * \frac{M_{HCN}}{M_{NO}} * C_{NO} - k_6 e^{-\left(\frac{E_6}{T_p}\right)} * \frac{C_{NO}}{C_C} \right) \\
\frac{dC_{NH_3}}{dt} &= - \frac{k_2 * e^{-\left(\frac{E_2}{T_g}\right)} C_{NH_3} C_{O_2} M_{NH_3}}{M_{O_2} \left(1 + k_3 e^{\left(\frac{E_3}{T_g}\right)} C_{O_2} \frac{M_{NH_3}}{M_{O_2}}\right)} - k_4 e^{-\left(\frac{E_4}{T_g}\right)} \frac{M_{NH_3}}{M_{NO}} C_{NH_3} C_{NO} + \frac{M_{NH_3}}{M_{HCN}} k_1 e^{-\left(\frac{E_1}{T_g}\right)} \frac{M_{HCN}}{M_{O_2}} C_{HCN} C_{O_2}
\end{aligned} \right.$$

Де C_{NH_3} , C_{HCN} , C_{NO} , C_{O_2} – масові концентрації NH_3 , HCN , NO , O_2 ; $E_1 - E_{11}$ – енергія активації; $k_1 - k_{11}$ – постійна, залежність від природи реагуючих речовин; M_{HCN} , M_N , M_{O_2} , M_{NO} , M_{NH_3} , M_{NO} – молекулярна маса речовин; N_p – вміст азоту в горючій масі палива; V^p – вміст летючих в паливі; T_g , T_p – температури відповідно газу і частинок палива

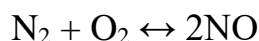
2.2 Аналіз кінетичної схеми та математичне моделювання утворення оксидів азоту за моделлю Гусєва-Зайчика Кудрявцева

При аналізі розрахункової моделі було зауважено, що значення концентрації атомарного азоту дуже малі і до того ж швидко зменшуються по часу, швидкість утворення молекулярного азоту падає ще швидше, так як залежність від квадрата концентрації.

Степінь газифікації азоту палива являється однією з важливіших факторів, впливу на утворення оксидів азоту. Вона залежить від температури процесу і виходу летючих на роботу масу вугілля.

$$\gamma = \frac{0.4861 \cdot V^P + k_7 \cdot \exp\left(-\frac{E_7}{T_g}\right)}{1 + k_7 \cdot \exp\left(-\frac{E_7}{T_g}\right)} - \text{ступінь газифікації}$$

Розрахункова схема утворення оксидів азоту по моделі І.М. Гусєва, Л.І. Зайчика і Н.Ю. Кудрявцева заснована на спрощених брутто-реакціях [22, 23, 29]:



$$\begin{cases} \frac{dC_{N_2}}{dt} = k_1 \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{T_g}\right) \frac{C_N}{T_g} \\ \frac{dC_{N_T}}{dt} = \left(\frac{1}{2} + \frac{\arctg(22.2 \cdot V^P - 1.7)}{\pi}\right) \cdot k_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_2}{T_g}\right) (C_{NO} - C_{N_T}) \\ \frac{dC_{NO}}{dt} = k_4 \cdot \exp\left(-\frac{E_4}{T_g}\right) C_N \left(\frac{r_{O_2}}{T_g}\right)^2 + k_5 \left(-\frac{E_5}{T_g}\right) \cdot k_6 \left(\frac{r_{O_2}}{T_g}\right)^{\frac{1}{2}} \end{cases}$$

Де: C_N , C_{N_2} , C_{N_0} - масові концентрації газофазних азотовмісних речовин палива, відповідно у вигляді атомарного азоту, при цьому на NH_3 , HCN поширюється узагальнена назва «атомарний азот»; C_{N_T} , C_{NO} - повні масові концентрації виходять з палива азотовмісних речовин відповідно поточна і кінцева; r_{O_2} - об'ємна концентрація кисню; V^P - вміст (інтегральний вихід)

летючих щодо маси палива; T_g , T_p - температури відповідно газу і частинок палива; $E_1 - E_7$ – енергія активації; $k_1 - k_7$ – постійна, залежність від природи реагуючих речовин

В цих рівняннях можна не враховувати молекулярний азот, отриманий з азоту палива, із за його невеликої кількості.

Представлена розрахункова модель утворення оксидів азоту при спалювання твердого палива зберегла свою простоту. Введення в рівняння масштабного множника.

2.3 Числові методи вирішення систем кінетичних рівнянь

В розрахунковій практиці є необхідність вирішення диференціальних рівнянь з початковими умовами. При вирішення таких задач широко використовується метод Рунге-Кутта, використання яких зв'язано з визначенням правої частини системи звичайних диференціальних рівнянь в проміжних точках. Другу групу методів складає багатокрокові, коли вираховується три чи більше розрахункові шари. [34]

В залежності від виду умов, які повинні задовольняти числове вирішення, розглядається 3 види задач, для вирішення яких доведено існування і єдине вирішення.

Перший вид – це задачі Коші або задачі з початковими умовами:

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{f}(\bar{y}, t),$$

Разом з початковими умовами:

$$\bar{y}(t_0) = \bar{y}_0,$$

$$\bar{y}_0 = \begin{pmatrix} y_{1,0} \\ y_{2,0} \\ \dots \\ y_{n,0} \end{pmatrix}$$

Де вирішенням являється:

$$\bar{y} = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_n(t) \end{pmatrix}$$

Права частина системи диференціальних рівнянь n -порядку:

$$\bar{f}(\bar{y}, t) = \begin{pmatrix} f_1(y_1, y_2, \dots, y_n, t) \\ f_2(y_1, y_2, \dots, y_n, t) \\ \dots \\ f_n(y_1, y_2, \dots, y_n, t) \end{pmatrix}$$

До другого виду задач відносяться граничні або краєві задачі, в яких додаткові умови зв'язані з вирішенням через функціонально співвідношення. При цьому кількість додаткових умов повинно відповідати порядку n системи або рівняння.

Третім видом задач – це задачі з власним значенням. Різниця цих задач від інших видів полягає в тому, що крім шуканої функції $y(x)$ і їх похідних додатково в рівняння входять m невідомих параметрів $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$. Це називається власним значенням. Таким чином, отримання єдиного вирішення на інтервалі $[x_0, x_k]$ потребує задавати $n+m$ граничні умови.

Числове вирішення системи диференціальних рівнянь потребується, коли відомі функції не вдається отримати аналітичним вирішенням задач. Слідую

відзначити, що в деяких задачах навіть при існуванні аналітичного вирішення, числові методи являються найбільш ефективними.

2.3.1 Аналіз чисельного методу вирішення диференціальних рівнянь Рунге-Кутта

Основний принцип методів складається в тому, що похідні на інтервалі $[x_0, x_0+h]$ в точках, обраних за умовою найбільшої близькості алгоритму до ряду Тейлора, апроксимуючих через значення функції $f(x, y)$. В залежності від вищої степені h , з якої ведеться обрахування члену ряду, вираховується схема Рунге-Кутта побудована для різних порядків точності. У зв'язку з цим для системи простих диференціальних рівнянь використовується класичний метод Рунге-Кутта і методи багатокрокового вирішення задачі Коші[34].

В розрахункових схемах методів Рунге-Кутта четвертого порядку в тейлорівському ряду, шукане вирішення $\vec{y}(t)$ враховуються члени, які мають до четвертої включно степені кроку h . Апроксимація похідних правих частин системи простих диференціальних рівнянь дає схему Рунге-Кутта четвертого порядку, яка приведена нижче

$$\bar{y}_{m+1} = \bar{y}_m + h(\bar{k}_1 + 2\bar{k}_2 + 2\bar{k}_3 + \bar{k}_4)/6$$

Розрахунок нового значення проходить в 4 стадії:

$$\begin{aligned}\bar{k}_1 &= \bar{f}(\bar{y}_m, \bar{t}_m) \\ \bar{k}_2 &= \bar{f}(\bar{y}_m + 0.5 \bar{k}_1 h, \bar{t}_m + 0.5 h) \\ \bar{k}_3 &= \bar{f}(\bar{y}_m + 0.5 \bar{k}_2 h, \bar{t}_m + 0.5 h) \\ \bar{k}_4 &= \bar{f}(\bar{y}_m + \bar{k}_3 h, \bar{t}_m + h)\end{aligned}$$

\bar{y}_m - наближення вирішення системи при $t=t_m$.

Ця схема при кожному кроці h вираховує праві частини системи диференціальних рівнянь 4-проміжних точок.

2.3.2 Аналіз чисельного методу вирішення диференціальних рівнянь Мерсона

Метод Мерсона – являє собою однією з модифікацій методу Рунге-Кутта 4-го порядку [34]. Особливістю даного методу є можливість оцінювати похибку на кожному кроці. Це допомагає скоротити час розв’язання диференціального рівняння. Розглянемо на прикладі

$$y' = f(x, y)$$

Початкова умова $y(x_0)=y_0$. Після цього задаємо початковий крок інтегрування та точність на кожному кроці обчислюємо коефіцієнт:

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_i, y_i) \\ k_2 &= hf\left(x_i + \frac{h}{3}, y_i + \frac{k_1}{3}\right) \\ k_3 &= hf\left(x_i + \frac{h}{3}, y_i + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{6}\right) \\ k_4 &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{8} + \frac{3k_3}{8}\right) \\ k_5 &= hf\left(x_i + h, y_i + \frac{k_1}{2} - \frac{3k_3}{2} + 2k_4\right) \end{aligned}$$

Після цього послідовні значення y_i шуканої функції y визначаються за наступною формулою:

$$y_{i+1} = y_i + (k_1 + 4k_4 + k_5)$$

2.4 Висновки за розділом

У даному розділі було представлено аналіз кінетичних моделей утворення оксидів азоту, та їх математичне моделювання. Було обрано моделі Гусєва-Зайчика-Кудрявцева, так як ці моделі мають оптимальну кількість реакцій, мають точність розрахунку утворення оксидів азоту.

За основу було використано числовий метод вирішення диференціальних рівнянь, метод Мерсона, так як, даний метод має більшу точність і дає можливість оцінювати похибку на кожному кроці, що допомагає скоротити час розв'язання диференціального рівняння

3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ

Для розробки програмного забезпечення було обрано об'єктно-орієнтовану мову програмування C++ та середовище розробки – Microsoft Visual Studio 2013.

C++ є мовою програмування високого рівня з підтримкою декількох парадигм програмування: об'єктно-орієнтованої, узагальненої та процедурної. Розроблена Б'ярном Страуструпом та спочатку називалася «Сі з класами». Стандартна бібліотека C++ включає стандартну бібліотеку С з невеликими змінами. Інша велика частина бібліотеки C++ заснована на Стандартній Бібліотеці Шаблонів (STL).

Вибір мови C++ обумовлений наступними її особливостями:

1. Швидкодія. Швидкість роботи програми, яка написана мовою C++, не поступається іншим мовам, а в деяких випадках навіть значно переважає, тому її широко застосовують при розробці ресурсоємних доданків практично в будь-якій області.
2. Кросплатформність. Мовою C++ розробляють додатки для різноманітних платформ та систем.
3. Можливість роботи на низькому рівні з пам'яттю, адресами, портами.

Microsoft Visual Studio – серія продуктів фірми Майкрософт, які включають інтегроване середовище розробки програмного забезпечення та ряд інших інструментальних засобів. Ці продукти дозволяють розробляти як консольні програми, так і програми з графічним інтерфейсом, в тому числі з підтримкою технології Windows Forms, а також веб-сайти, веб-застосунки, веб-служби як в рідному, так і в керованому кодах для всіх платформ, що підтримуються Microsoft Windows, Windows Mobile, Windows Phone, Windows CE, .NET Compact Framework та Microsoft Silverlight

3.1 Структура обчислювального модуля:

В даний програмний продукт входять наступні компоненти:

- файли форм – MyForm.h;
- файл проекту – Project1.cpp.

Призначення основних елементів програмного модуля наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні елементи обчислювального модуля та їх призначення

Елемент	Назва	Призначення
Форма (Form)	Myform.h	Основна форма для введення вхідних даних
Текстові поля (TextBox)	Textbox1-Textbox-17	Введення вхідних даних Виведення результатів
Графік Chart	Chart1,Chart2, Chart3	Представлення результатів розрахунку у вигляді графіку
Клавіша Command Button	Buttorn1	Виклик процедури розрахунку
Таблиця DataGridView	DataGridView1- DataGridView3	Представлення результатів у табличному вигляді
Заголовки Label	Label1-Label20	Текстове оформлення

Розроблений програмний модуль складається з 1 процедури обробки подій. Призначення цих процедур наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.2 – Процедури обчислювального модуля та їх призначення

Назва процедури	Призначення
Command1_Click	Обробка процедури натиснення кнопки розрахунку, Виклик процедури виконання розрахунків

Отже, в даному розділі подана характеристика елементів, що входять до складу розробленої програми, а саме основних процедур та компонентів, що були використані. Даний програмний модуль можна використовувати для розрахунку викидів оксиду азоту з використанням будь-якого вугілля.

3.2 Інструкція користувачу програмного продукту

Програмний модуль призначений для розрахунку утворення оксиду азоту за допомогою двох математичних моделей з різними впливами на процес, а саме, зміна температури, зміна концентрації O_2 та час згорання палива. Головне вікно містить поля для вводу вхідних даних, а саме, концентрацій компонентів вугілля, в початковий момент часу, фізичні характеристики вугілля, питома теплоємність, початкова та кінцева температура реакції, початкова та кінцева концентрація кисню та час спалювання.

Для виконання розрахунків слід ввести вихідні дані у відповідні поля та натиснути кнопку «Розрахунок». Після чого відбудеться розрахунок (рисунок 3.2). Алгоритм розрахунку приведено в додатку А.

Програмний модуль розрахунку процесу утворення оксидів азоту

Введення даних: Динаміка утворення NO | Залежність утворення NO від температури згорання | Залежність утворення NO від концентрації O₂

Склад палива %

Концентрація вуглецю: 92,5 Питома теплоємність кДж/кг: 34300 Початкова температура згорання К: 1000

Концентрація кисню: 2,58 Вихід летючих на горючу масу %: 4 Кінцева температура згорання К: 1900

Концентрація азоту: 0,79 Крок температури: 100

Початкова концентрація O₂ %: 7

Кінцева концентрація O₂ %: 14

Крок концентрації: 1

Час згорання с.: 3

Крок: 0,5

1-Модель Мітчелла-Тербелла

2-Модель Гусева-Зайчика-Кудрявцева

Розрахунок

Рисунок 3.1 – Вікно вводу вхідних даних.

У вікні «Динаміка утворення NO» представлені результати розрахунку: таблиця даних та графік залежності концентрації NO від часу згорання:

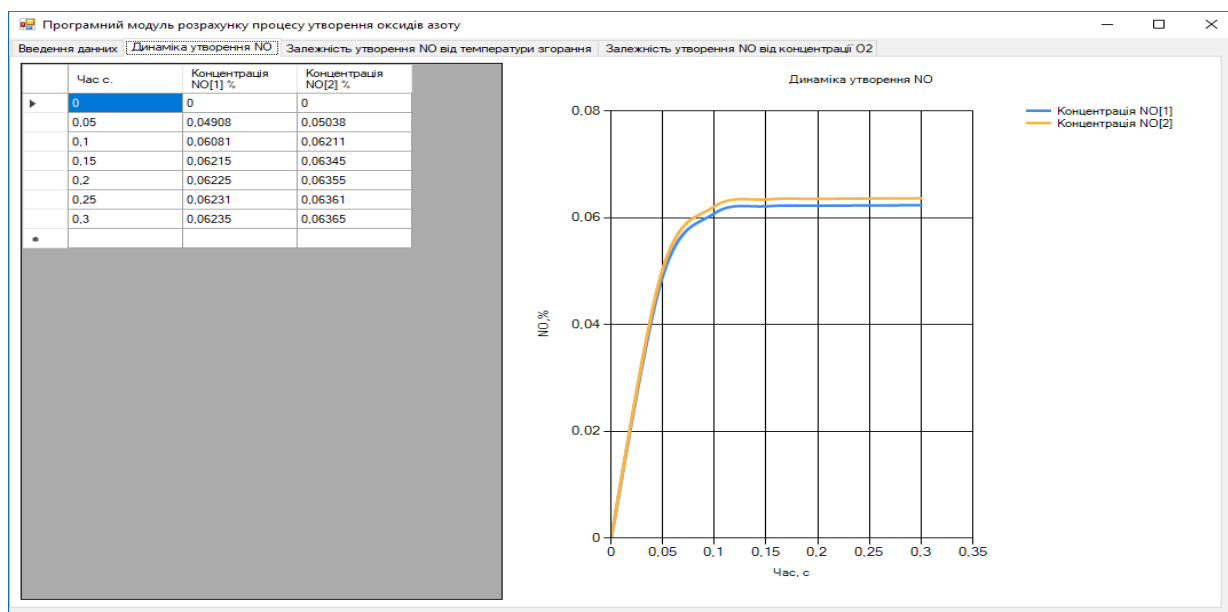


Рисунок 3.2 – Вікно «Динаміка утворення NO»

У вікні «Залежність утворення NO від температури реакції» представлені результати розрахунку: таблиця даних та графік залежності концентрації NO від температури згорання.

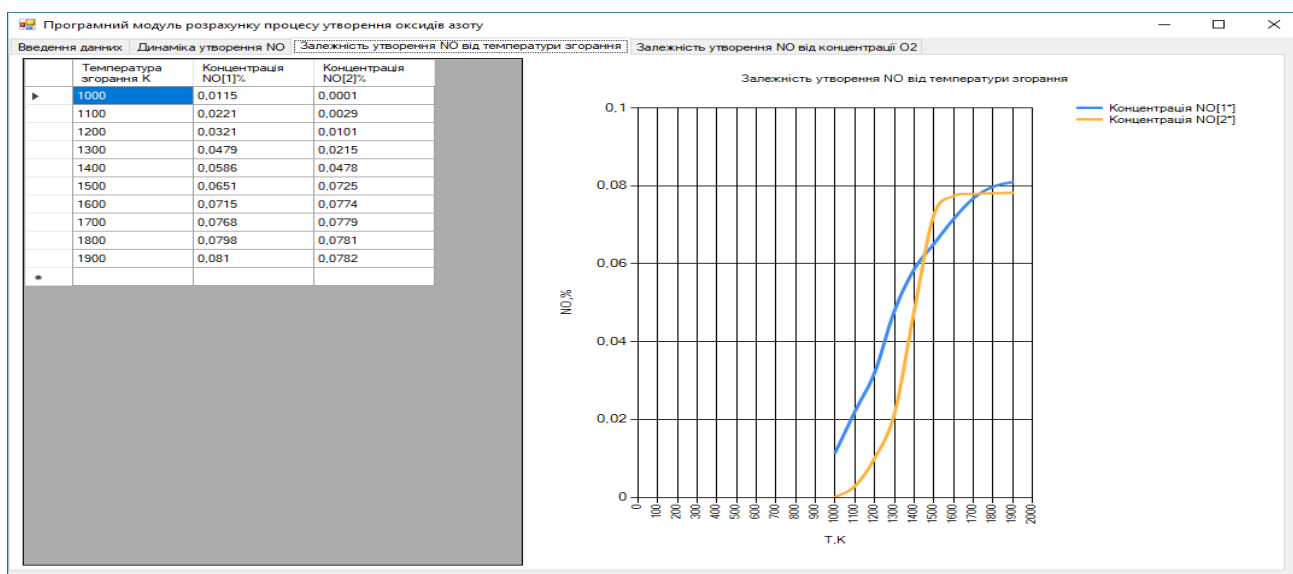


Рисунок 3.3 – Вікно «Залежність утворення NO від температури згорання»

У вікні «Залежність утворення NO від концентрації O₂» представлені результати розрахунку: таблиця даних та графік залежності концентрації NO від концентрації O₂:

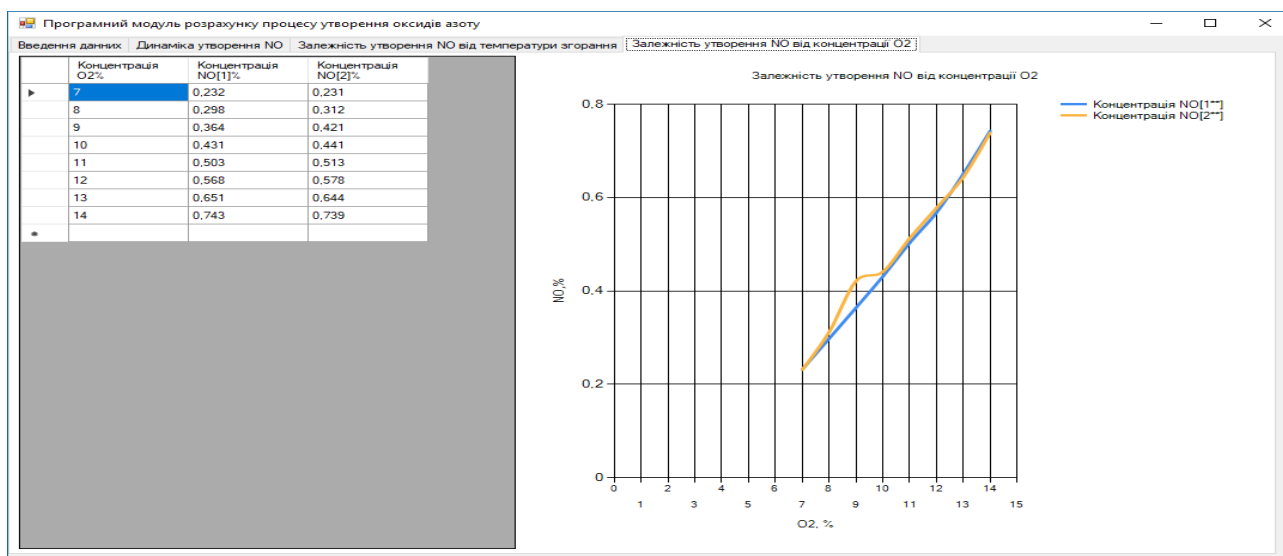


Рисунок 3.4 – Вікно «Залежність утворення NO від O₂»

Отже, в результаті роботи програми отримуємо:

- Таблиці даних з концентраціями оксиду азоту при різних умовах і різних методах;
- Графіки зміни концентрації оксиду азоту при різних умовах і різних методах;

3.3 Аналіз отриманих результатів

В даній програмі розглядалося математичне моделювання утворення оксидів азоту при горінні антрациту на базі розробки Мітчелла і Тербелла кінетичної моделі утворення NO_x , а також з використанням моделі, розробленої Гусєвим, Зайчиком і Кудрявцевим. Для рішення системи диференційних рівнянь використовувався метод Мерсона.

Розглянуті кінетичні моделі утворення NO при згоранні антрациту зрівнювались між собою. При аналізі досліджувався вплив температури, вміст кисню, склад азоту в антрациті на значення концентрації NO.

На рис. 3.5 зображено графік, який представляє собою динаміку утворення NO_x .

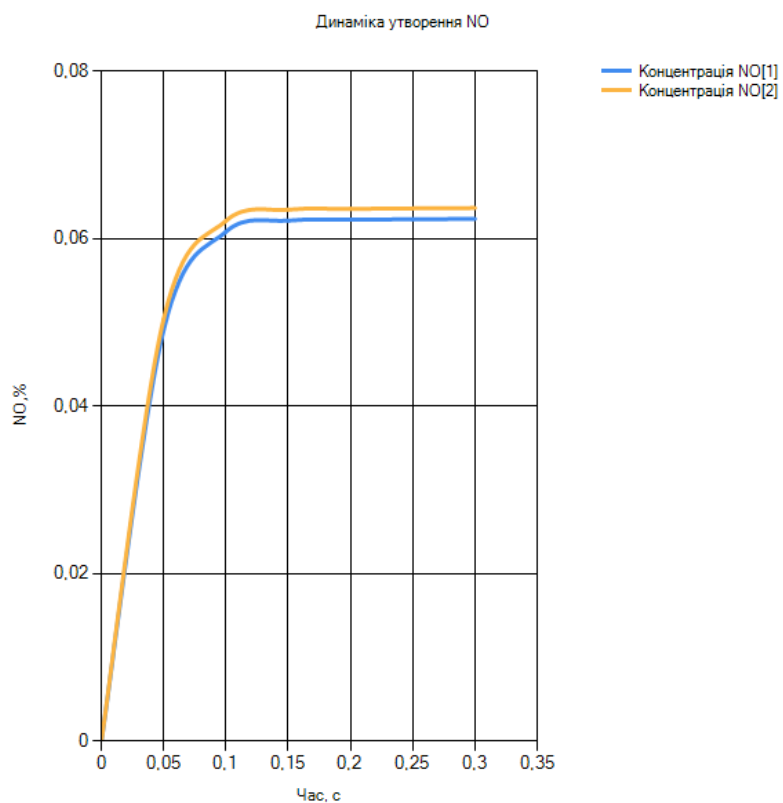


Рисунок 3.5 – Динаміка утворення

На рис. 3.6 зображено графік, який представляє собою залежність концентрації NO_x від концентрації кисню в одномірному потоці аеросуміші, яка міститься в антрациті.

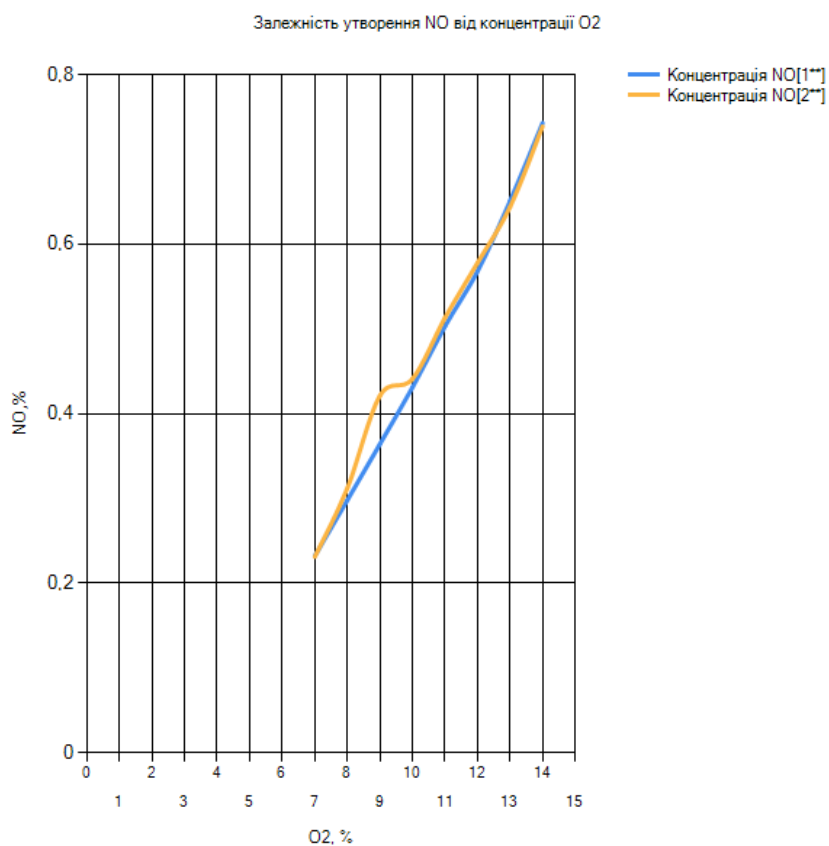


Рисунок 3.6 – Залежність утворення NO від O₂

Зменшення концентрації кисню в потоці приведе до зменшення концентрації та зменшення кінцевого виходу NO_x.

На рис. 3.7 представлено графік залежності концентрації NO_x від температури.

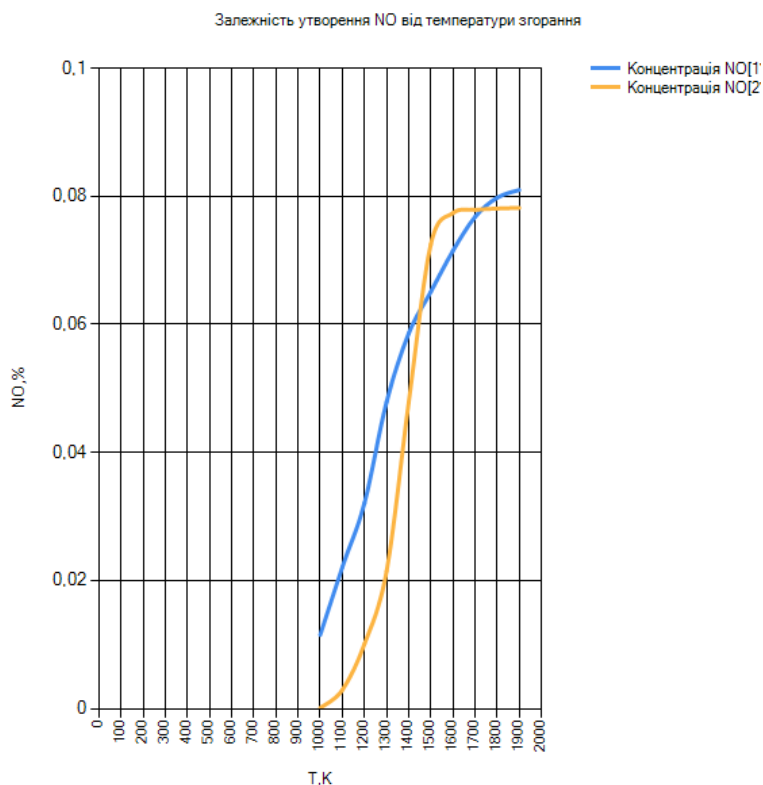


Рисунок 3.7 – Залежність утворення NO від температури згорання

Видно, що зниження температури потоку приводить до зменшення концентрації NO_x . Оксиди азоту утворюються в основному з азоту, який міститься в паливі; при подальшому збільшенні температури, збільшиться доля термічних оксидів азоту в сумарній концентрації NO_x .

3.4 Висновки за розділом

У даному розділі було представлено розробку програмний модуль для моделювання процесу утворення оксидів азоту, який відображає основну задачу та результати магістерської дисертації. Розроблений програмний модуль може бути корисним на етапах обрання твердого палива та впровадження його на виробництво.

4 МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ В РОЗРАХУНКОВОМУ ПАКЕТІ FIRE 3D

В даний час основний напрямок діяльності провідних фірм - виробників програмного забезпечення для комп'ютерів на базі PC тісно пов'язане з розробкою додатків під WINDOWS і UNIX. Загальна риса їх подальшого розвитку - розширення підтримки в даному середовищі додатків в зв'язку з більшою програмної сумісністю складних систем застосування комп'ютерних технологій. Такий підхід має свої проблеми в якості захистів програмних середовищ від зовнішнього втручання у вигляді збільшення процесу зростання технічних потенціалів або його порушення поза природного техногенного та гуманітарного фону - відповідно зростання рівня і якості злочинів, які можуть потенційно привести до катастроф і правопорушень, починаючи від середнього масштабу і вище. У зв'язку з цим представляється деяка актуальність модифікації активно використовуваних програм, розроблених для оптимізації технічних систем на платформі WIN32 і UNIX32 для експертної діагностики техногенної обстановки на будь-якому виробництві, з найбільшим дотриманням консерватизму стосовно витраті ресурсів комп'ютерної станції, як місць розташування вигідною зовнішньої або внутрішньої «паразитного» інтелектуальної активності. Такий процес підвищує техногенні або природні ризики експлуатації. [35]

На перерахованих вище комп'ютерних платформах є вбудовані підсистеми для програмування тривимірної графіки, створення багатопоточних програм, які повністю використовують ресурси багатопроцесорних систем, а також вбудовані драйвери для обміну даними по мережі при кластерних обчисленнях з використанням декількох машин. Результати цієї діяльності мають велике прикладне значення і в той же час безпосередню технічну небезпеку або загрозу при проведенні масових обчислень перевищенням природних норм розподілу потужності техногенного обладнання, застосуванням комбінаторики ресурсів станції або досліджуваних об'єктів нагляду або проектування. У цьому спектрі знаходяться ресурси при розрахунку технічних пристроїв і агрегатів, що

прискорюють процес отримання результатів, засоби параметризації обчислень і обладнання.

4.1 Опис пакету FIRE 3D

В даній роботі для вирішення рівнянь математичної моделі використовувався розрахунковий пакет FIRE 3D, який був розроблений в 2005 році у Томському державному університеті і призначений для розрахунку просторових характеристик аеродинаміки, тепло- і масообміну і горіння в котлах при факельному згоранні пиловугільного палива. FIRE 3D включає в собі три послідовні частини обробки даних[35]:

1. Mesh Creator – для імпорту з текстового файлу розрахункових сіток трьох мірної геометрії;
2. Flow Searcher, використовується для розрахунку турбулентних течій і теплообміну з можливістю використання для опису горіння і рух частин вугілля;
3. Data Vision, використовується для візуалізації представлення результатів розрахунків.

Препроцесор Mesh Creator в пакеті FIRE 3D призначений для побудови грубих розрахункових сіток, використовуваних в Flow Searcher. Розрахункова сітка в даному додатку будується на основі геометричних даних котлів і з урахуванням схеми згорання палива, а також характеристик палива, також вказується умови вводу палива в котел через пальники.

Програмне забезпечення створення грубих сіток ділиться на два методи:

- Метод конвертації текстових файлів в двійковий формат файлу програмою MESH CONVERTER. При такій схемі сітки і дані створюються в будь-якому текстовому редакторі, а потім конвертуються в двійковий формат програмним забезпеченням;

- Метод виготовлення двійковій-текстових сіток за допомогою ресурсів графічних інтерфейсів операційної платформи засобами BORLAND DELPHI VCL в додатку MESH CREATOR.

Перший метод більш надійний по відношенню до використання ресурсів робочої станції, компілятора. Хоча цей метод по відношенню до ресурсів операційної системи не краще, ніж другий метод. Другий метод включає в себе просто конвертер з текстових сіток і назад. Плюс до конвертерів можна змінювати грубі сітки і параметри мишкою і клавіатурою через інтерфейс програми. Є в наявності автоматизація деяких формул залежності параметрів обчислень і сіток. Наприклад, розподіл Розіна-РАММЛЕРА для дисперсної фази і поправка рівності точних розбиття на скосах за координатами скоса. Така функціональність вимагає ручної роботи під час написання SMS сіток для просто конвертації в двійкову. В обох випадках параметри обчислень грубої сітки знаходяться в текстовому INI-файлі, а сама сітка в текстовому або двійковому вигляді.

Додаток засноване на 5 об'єктно-структурних компонентах, перерахованих у введенні, плюс об'єкт генерації точної сітки і записи її на диск.

Програма розрахунку SEARCHER була виготовлена в середовищі DELPHI із застосуванням технології «текстової консолі» і можливістю підключення до неї бібліотеки компонентів інтерфейсу управління WINDOWS або UNIX (якщо використовується BORLAND KILIX або інший OBJECT PASCAL), як альтернатива набору в командному рядку. Консоль забезпечує наявність команд управління додатком і спеціально виготовленого командного інтерпретатора, який розуміє близько 15 команд для пакетних розрахунків декількох топок по черзі або паралельно, при наявності ресурсів відповідного масштабу, без втручання оператора. Якщо в наявності є графічні елементи управління WIN32 або UNIX32, набагато простіше управляти параметрами процесу обчислення і можна проводити запис макросів, зберігати їх на диск для подальшого виконання.

Додаток SEARCHER призначений для розрахунку просторової аеродинаміки, хімії та фізики процесів на основі грубої сітки (IDENT. *, * .MSH), перетвореної в точну (* .CHF), з урахуванням перенесення тепла конвекцією і випромінюванням, при горінні полідисперсного пиловугільного палива для призматичних камер згоряння. Для замикання рівнянь Рейнольдса використовується двопараметрична «к-е» модель турбулентності, яка враховує дисперсні частинки в турбулізованому потоці. Для опису руху і теплообміну паливно-золових частинок в камері згоряння застосовується Лагранжа PSICELL-підхід [3], що дозволяє детально моделювати процеси виходу летючих і догорання коксового залишку, а також полідисперсність твердої фази. Перенесення тепла випромінюванням представляється в рамках P1-наближення методу сферичних гармонік, непогано зарекомендував себе при аналізі топкових процесів [4]. Система просторових рівнянь вирішується чисельно методом контрольного обсягу з використанням алгоритму SIMPLE Патанкар і Сполдинга.

У SEARCHER можна змінювати метод апроксимації конвективних членів:

- схема Патанкар 5-го порядку.
- схема MLU Ван Ліра.
- схема QUICK Леонарда.

У програмі передбачена можливість зміни методу розрахунку поправки тиску. У додатку SEARCHER реалізовані три схеми вирішення різницевого рівняння для поправки тиску:

- Явний метод Булєєва BU4.
- Метод сполучених невязок MRES за методом Булєєва.
- Метод Ван Дер Ворст BI-CGSTAB за методом Булєєва.

Методи володіють різною швидкістю збіжності на різних етапах обчислень. Так, для початкової фази в силу монотонності збіжність краще у явного методу Булєєва, тоді як на кінцевій стадії краще (більш швидкий) метод MRES або BI-CGSTAB.

У математичної частини передбачена можливість зміни методу релаксації на основі поправки тиску. У додатку SEARCHER реалізовані три схеми релаксації по поправці тиску:

- Лінійний коефіцієнт релаксації LINEAR, рівний константі;
- Індуктивно-конденсаційний метод DIVIDER приведення релаксації LINEAR по відношенню модуля максимальної поправки тиску до модуля максимального тиску для глобального ітерационного коефіцієнта, і по відношенню модуля поправки змінних до модуля змінної для локального коефіцієнта осередки, відмінусований з одиниці. Обидва коефіцієнта до базових обмежувачами константами по верху і низу;
- Метод DEPENDED, аналогічний DIVIDER, тільки зі змінною базою по ітераціям релаксації LINEAR.

Методи володіють різною швидкістю збіжності на етапах обчислень в порядку збільшення по пунктам. Так, DIVIDER при включенні в релаксацію рівнянь тиску дає дев'ятку збіжності поправки тиску на 10 ~ 20 ітерацій.

Додаток для багатопроцесорної некластерної системи SEARCHERMULTIPROCESSOR з графічним інтерфейсом або SEARCHERCONSOLE без графічного інтерфейсу з текстовою DOS консоллю має два основних потоку команд процесора: перший - для забезпечення взаємодії користувача з консоллю, другий - для розрахункового модуля, що знаходиться в стадії завдання системних параметрів методу обчислень в незапущеному стані. Після запуску потік створює клон себе самого для завдання іншої сітки даних і параметрів. Кількість активних потоків контролюється для відсутності перевантажень процесорів і оперативної пам'яті і обмежена тільки розміром цілочисельної змінної, що дозволяє запуск програми на будь-який багатопроцесорної некластерної системи.

Основа сумісності розрахункової частини PASCAL-модулів додатка, виготовленої в математичних позначеннях, з блоком інтерфейсу операційної системи - складальна командна консоль для взаємодії з екраном користувача і блок реєстрації та синхронізації математичної частини з блоком абстракцій і

документування даних технічного обладнання, що знаходиться в дослідженні. Через дані синхронізатори відбувається взаємодія FORTRAN-подібного програмного забезпечення з системними інтерфейсами обладнання зберігання, передачі інформації і відображення WIN32 або UNIX32 підсистеми DIRECTHAL (DIRECT HARDWARE ABSTRACTION LAYER 32 біта).

Отримані програмою FIRE 3D результати розрахунку температур, швидкостей і інших параметрів в котлах на наступному етапі можуть візуалізуватись програмою Data Vision. Візуалізація можна виконувати в двомірному і трьох мірному варіантах з відображення будь-якої кількості характеристик, які розраховані сітці з записом в файл в спеціальний формат. Додаток Data Visio універсально: характеристики можуть представлятись в векторному чи скалярному вигляді, можливий чорно-білий режим їх відображення. Принцип програми візуалізації простий: на основі розрахункової сітки будується площина, які відповідають зовнішнім видимим коміркам, замальовуючи які по кольоровій інтенсивності відповідають величині відображеного параметру.

Додаток Data Vision володіє можливістю показувати розрізи по координатах X, Y, Z і в залежності від цього, який встановлений розріз по осям, можна розглянути внутрішню структуру потрібних характеристик

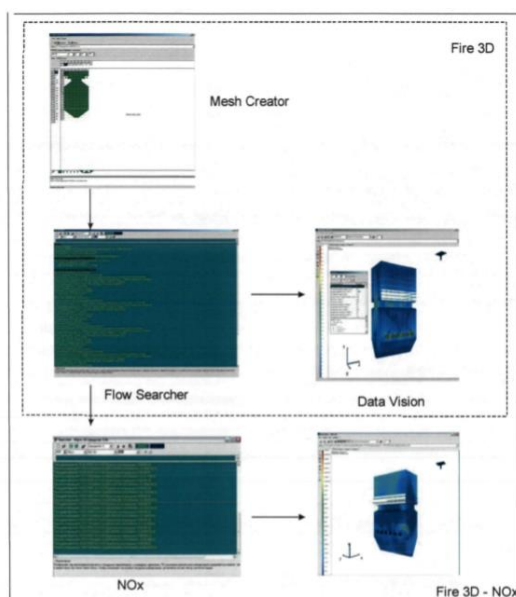


Рисунок 4.1 – Схема організації пакета прикладних програм FIRE 3D – NO_x

Також передбачена передача зображень і даних текстового виду для послідувочої побудови графіків в Excel.

4.2 Характеристика котла ТПП 210А

Пилоугільний котел, камерний котел для спалення твердого пиловидного вугілля. Котел використовується з паропродуктивністю 100-2000 т/год. В котлах даного типу є можливість використання всіх марок твердого вугілля з максимальною продуктивністю.[5]

На рис. 4.2 Зображено схема конструкції стандартного пальника для котла ТПП-210А

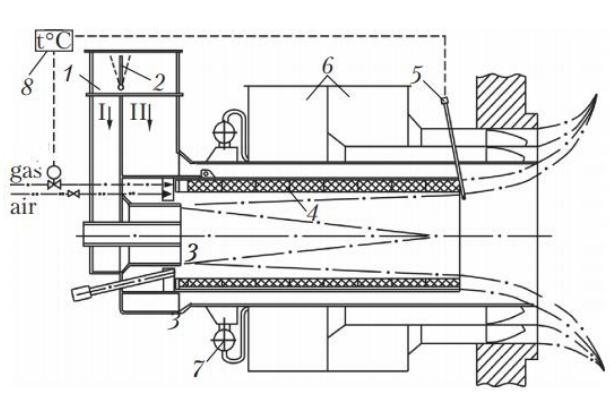


Рисунок 4.2 – Схема конструкції пальника для котла ТПП-210А [5]

1 — короб пилоподачі; 2 — поворотний шибер; 3 — запальний пристрій; 4 — муфельна камера термообробки пилу; 5 — датчики температури; 6 — короб подачі вторинного повітря; 7 — існуючий газовий колектор; 8 — контроль температур;

Через короб 1 подається первина аеросуміш, за допомогою поворотного шиберу, регулюється подача палива. За допомогою запального пристрою відбувається нагрівання муфельної камери термообробки пилу 4, та контроль температури 8 за допомогою датчика температури 4. Через короб подачі вторинного повітря 6 подається вторинне повітря, та через газовий колектор 7 відбувається підтримка температури газового котла.

4.3 Вихідні дані для розрахунку

За основу вихідних даних були використанні паспортні дані котла ТПП-210А. Геометрія області двокамерного котла з рідким шлаковидаленням наведено на рис. 4.3:

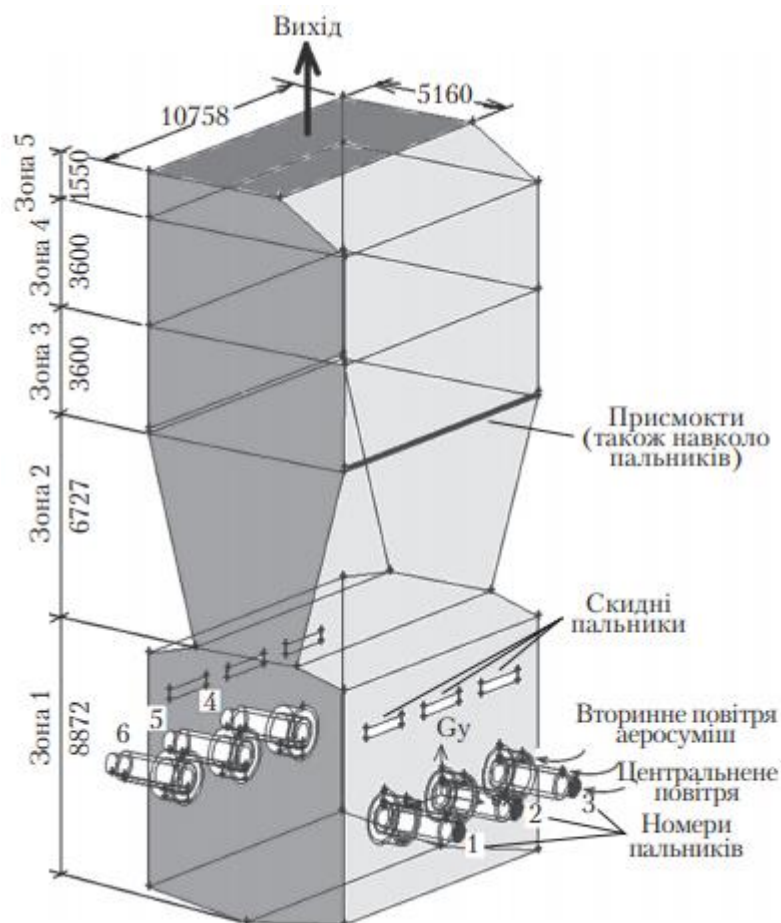


Рисунок 4.3 – Геометрія котла ТПП-210А [5]

Особливістю даного розрахунку являється те, що область розбита на 5 зон і обмежена стінками і поверхнею виходу. У першій зоні розміщено шість пальників, в які подається аеросуміш і вторинне повітря, п'ята зона закінчується найвужчим перерізом котла в районі аеродинамічного носа. Моделювання повороту потоку в зоні пережиму сильно ускладнювало процес, а наявні зворотні токи, як виявилось, викривляли результати на виході розрахункової зони. До поверхні стінок 1-ї зони включено і отвір виходу шлаку.

Таблиця 4.1 – Температури поверхонь стінок котла

№ зони	t °C вхідна	t °C середня	t °C вихідна
1	1467	1467	1467
2	1242	1169	1063
3	1063	1038	964
4	964	929	908
5	908	850	781

Для зон 2—5 в моделі вони апроксимовані лінійними залежностями від координати по висоті. При даному моделюванні окрім витрат вугілля у пальниках враховані: подача паливник повітря через скидні сопла й присмокти навколишнього повітря, що мають місце навколо фланців паливників і на вході до 3-ї зони. Режимні параметри, засновані на даних теплових розрахунків котла ТПП-210А, наведені в табл. 4.2.[5]

Таблиця 4.2 – Параметри вхідних потоків в номінальному режимі

Вид потоку	Повітря		Вугілля	Обертання
	m * кг/с	T К	m кг/с	U** _{танг} / U _{ос.}
Центральний потік	13,7	493	5,61	0,466
Первинна аеросуміш	18,1	387	11,22	1
Вторинне повітря	114,6	493	0	1,73
Повітря для газу	0,87	323	0	0
Скидне повітря	12,6	387	0	0
Присмокти	7,8	313	0	0
Газ	0,24	323	0	0

Як паливо розглядається вугілля марки А з меншою теплотою згоряння на робочу масу $Q_r = 23,5$ МДж/кг. Технічний аналіз робочої маси й елементного складу вугілля наведений у пункті 1.5.

Гранулометричний склад вугільних частинок прийнятий за формулою Розина—Раммлера з показником розподілу 1,1 у діапазоні 5—205 мкм із середнім розміром 40 мкм. Прийнято також, що вміст азоту розподілений між леткими й твердою частиною порівну, а повний вихід летючих (з урахуванням високотемпературного виходу летючих) в 1,7 рази перевищує результати стандартного технічного аналізу [6, 7].

Для вирішення поставленої задачі в першу чергу були виконані розрахунки течії та процесів утворення оксидів азоту не на всій паливній котла, показаній вище, а в об'ємі, приблизно відповідному до внеску одного пальника. Спосіб виділення цього об'єму ілюструється рисунком 4, на якому показана пальник котла (вид зверху).

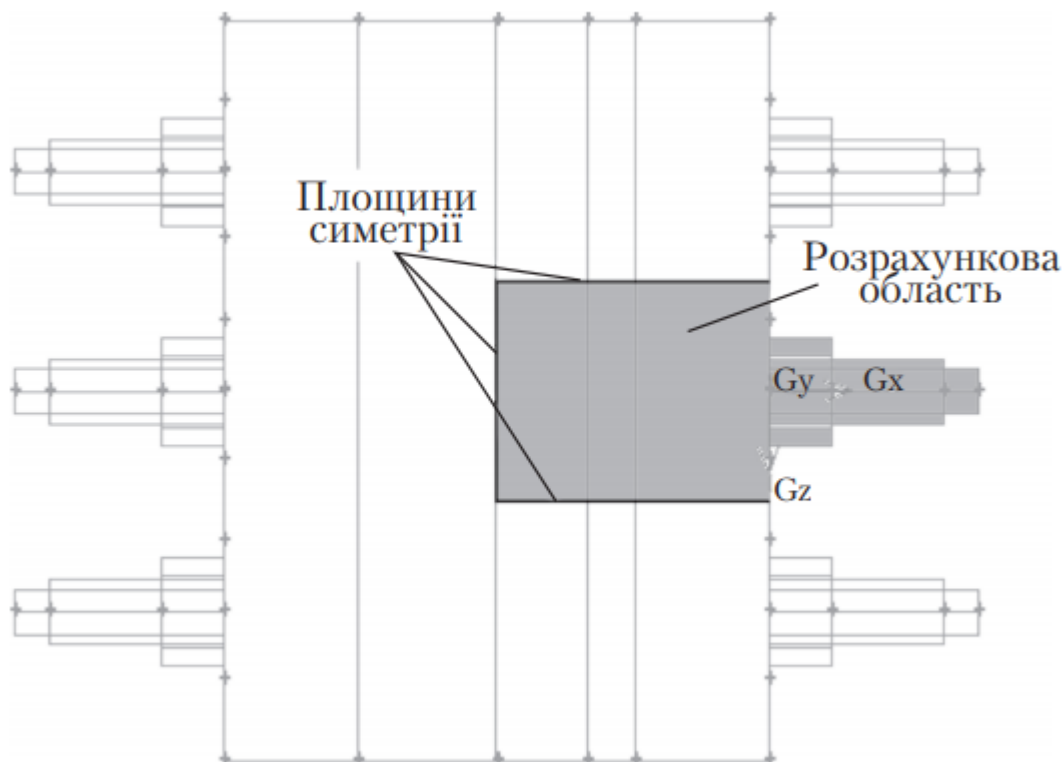


Рисунок. 4.4 – Розрахункова область

Виділена на рисунку розрахункова область примикає до 2-го (центрального) пальника, а верхня й нижня на рисунку площини симетрії відповідають половинам відстаней між осями пальників. Третя площина симетрії розміщена на половині відстані між фронтальною й тильною поверхнями паливні.

Такі допущення були прийняті з метою зменшення об'єму розрахункової області з відповідним зменшенням ресурсоемності завдання й скороченням часу одержання перших результатів розрахунків. Але результати, звичайно, обумовлені неповними відповідностями моделі реальному об'єкту. Зокрема, поперечний переріз розрахункової області в цьому випадку менше $1/6$ поперечного перерізу паливні (тоді як витрати компонентів для одного пальника становлять саме $1/6$ витрат для всієї паливні). Тому час перебування частинок у розрахунковому об'ємі розглянутої моделі буде занижено. Крім того, частка поверхні стінок у периметрі розрахункової області менша, ніж аналогічна частка в реальному об'єкті. І, нарешті, напрямок кручення потоків у частині суміжних пальників, що обмежують розрахункову область, не в повній мірі відповідає реальній паливні, що впливає на потоки газів в районі пальників. [5]

4.4 Базовий варіант розрахунку теплообміну і аеродинаміки в котлі

Вирішуючи завдання моделювання процесу утворення оксидів азоту, числові розрахунки проводились в наступному напрямі:

1. Температурний рівень в камері горіння;
2. Концентрація кисню в камері;
3. Концентрація оксидів азоту в камері.

На рис. 4.5 зображено поле температур в різних площинах.

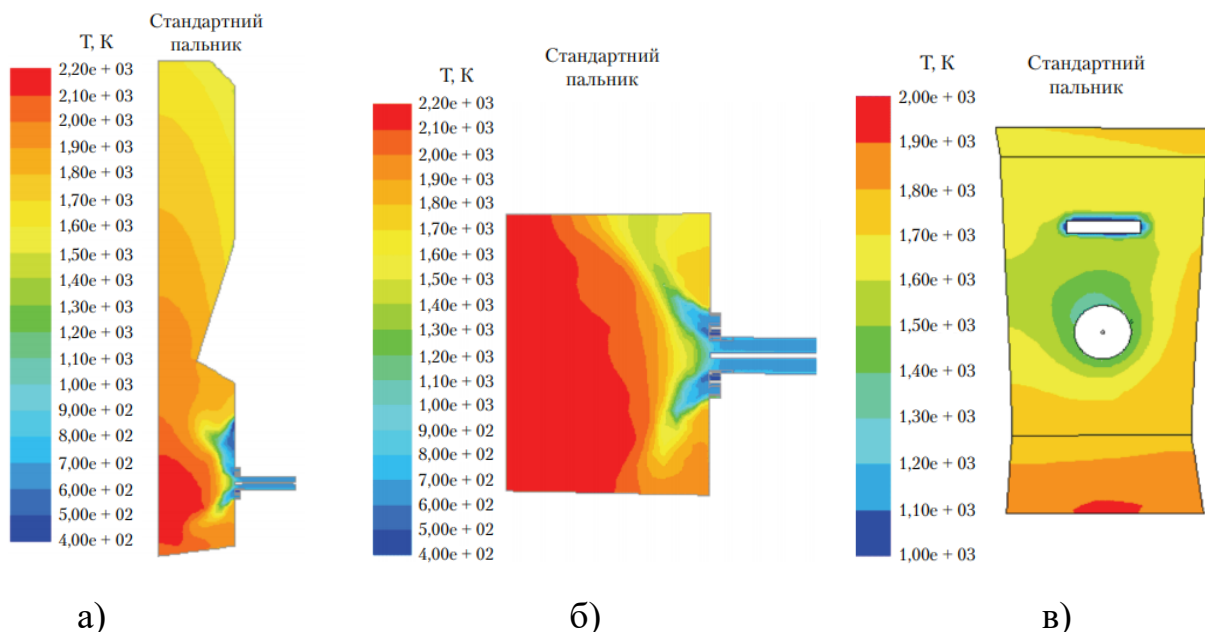


Рисунок 4.5 – Поля температур в площинах:
а – в площині X-Y; б – в площинах Z-X на рівні пальників; в – на поверхні стінок нижньої радіаційної частини

Температурний рівень в камері горіння помірний, розподілений рівномірно по перерізу. Область з пониженою температурою спостерігається на рівні пальників, із-за надходження аеросуміші з невисокою температурою, а також в верхній частині вихідного газового вікна.

Зона активного горіння виділяється в вертикальному перетині, який проходить по осі пальника і міжпальниковому просторі, знаходиться нижче пальникових пристроїв з температурою 1700 – 1916 К. По висоті охолоджується до середньої температури 1576 К.

На рис. 4.6 зображено поле концентрації кисню в площині X-Y та в області пальників у збільшеному масштабі.

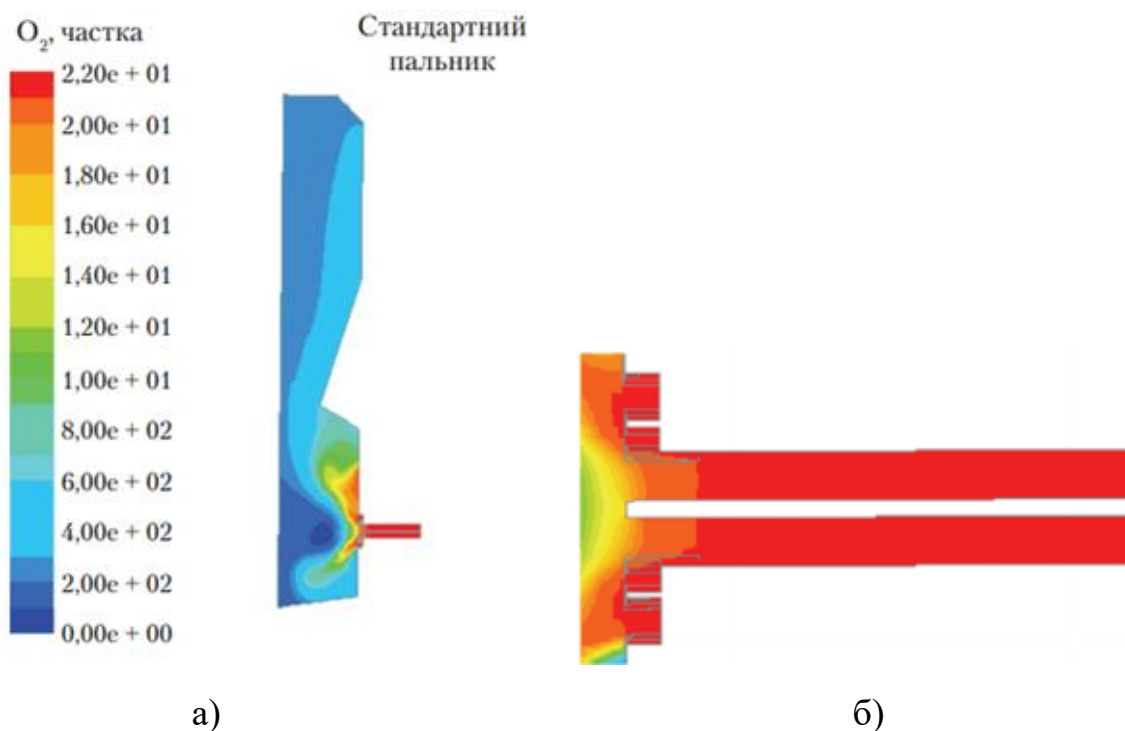


Рисунок 4.6 - Поле концентрації кисну в :
а – площині X-Y; б – область пальника у збільшеному масштабі

Концентрація кисню найвища в області пальника, що становить близько 2,52% об'ємної частки, біля пальникових пристроїв кисень майже відсутній. Це створює середовище, що дозволяє відновлювати з його оксидів. По висоті концентрація кисню рівномірно розподілена.

На рис. 4.7 представлено поле концентрації оксидів азоту в різних площинах:

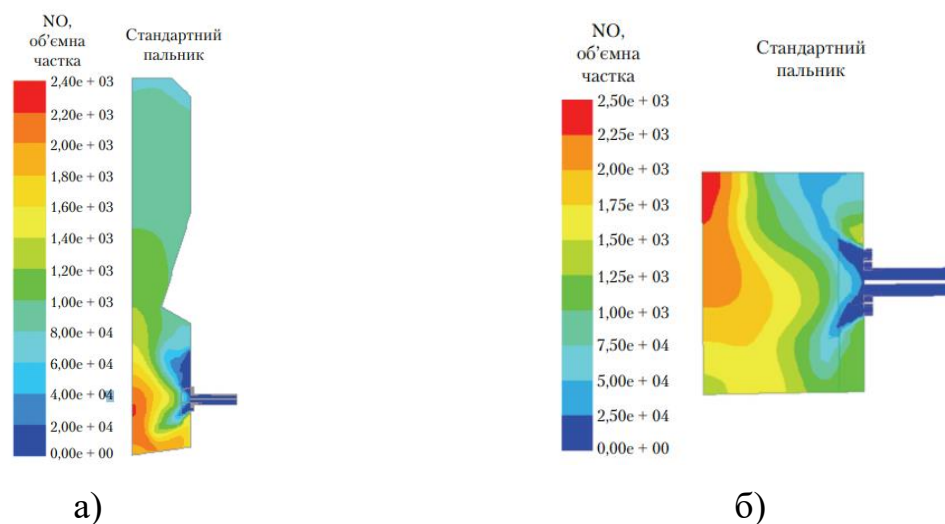


Рисунок 4.7 – поле концентрації оксидів азоту
а – в площині X-Y; б – в площині Z – X

Процес утворення оксидів відбувається в зоні пальникового поясу, і по факелу майже не змінюється, це говорить про те, що утворення відбувається на стадії спалювання летких. Утворення оксидів азоту в камері в невеликих кількостях від кінцевої концентрації на виході із котла відбувається за рахунок виходу залишкового азоту в коксових частках, що виносять з камери горіння.

4.6 Висновки за розділом

Розроблено постпроцесор до пакету прикладних програм FIRE 3D – NO_x призначений для розрахунку утворення оксидів азоту в вихрових пиловугільних котлах, було досліджено температурний рівень по довжині котла, концентрацію кисню і концентрацію оксидів азоту в котлі ТПП-210А для вугілля марки антрацит.

5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап (від англ. startup company, startup, той, хто стартує) – компанія з короткою історією діяльності. Сьогодні стартап – це тимчасова структура, метою якої є пошук і опрацювання бізнес-моделі діяльності.

Основними завданнями стартапів є:

- пошук ідеї, яка може спростити повсякденне життя споживачу;
- організація виробництва продукту відповідно до ідеї;
- утримання виробництва певний час для задоволення визначеної потреби;
- забезпечення зростання виробництва у процесі діяльності.

Стартап є механізмом реалізації інноваційної моделі підприємницької діяльності – передбачає використання будь-яких можливостей (у межах закону) для підприємництва, навіть якщо власних ресурсів для цього недостатньо. Схема дій при розробці і реалізації стартапу наступна: формування мети, вивчення зовнішнього середовища у пошуках альтернативних можливостей, оцінка власних ресурсів і співставлення їх зі знайденими можливостями, пошук у зовнішньому середовищі додаткових джерел ресурсів, діяльність з реалізації мети.

Економічна частина дипломної роботи передбачає оцінку можливості комерціалізації розробки. Сучасним підходом до оцінки ринкової цінності ідеї, технології, методики є формування стартап-проекту.

Метою написання економічної частини магістерської дисертації у студентів технічного напрямку підготовки є формування:

- здатності застосовувати професійно профільовані знання і практичні навички з хімічної технології і інженерії для оцінювання спроможності реалізовувати та комерціалізувати розробки у сфері хіміко-технологічних процесів;

– системних знань і навичок щодо ефективного використання ресурсів для досягнення мети господарської діяльності з найменшими затратами у стислі терміни.

Під час виконання економічної частини студенти мають продемонструвати такі результати навчання: знання:

- положень законодавства України для виробництва з метою визначення економічних показників типових хімічних виробництв і хімічної продукції;
- основ управління операційною діяльністю підприємства;
- з підготовки і прийняття управлінських рішень;
- з теорії ризик-менеджменту;
- основ ціноутворення як інструмента управління впровадженням інноваційної розробки та управління ризиками;
- маркетингу як концепції управління;
- планування виробничих процесів та запасів;

Вміння:

- визначати економічну ефективність розробки;
- аналізувати зовнішнє та внутрішнє оточення реалізації розробки та визначати загрози та можливості діяльності на основі аналізу;
- визначати потенційних споживачів та обсяг попиту, що вони формують;
- застосовувати економічні принципи вибору сировини і матеріалів, енергетичних ресурсів з урахуванням вимог до екологічності хімічних виробництв, захисту навколишнього середовища і охорони праці на хімічних виробництвах;
- визначати раціональні виробничі і організаційні структури для вирішення швидких завдань розробки;
- формувати оптимальну схему організації співпраці з зацікавленими сторонами;
- визначати оптимальну ціну для інноваційної розробки;
- визначати ризики інноваційної розробки та пропонувати методи управління ними.

5.1 Резюме: конкретизація бізнес-ідеї, мети стартапу, об'єкту дослідження, місця розробки у інноваційному ланцюжку цінності

Бізнес-ідея: застосування системи подачі в факел пилу високої концентрації з розрідженням для зменшення викидів оксидів азоту при згоранні палива.

Метою стартапу є впровадження систем подачі в факел пилу високої концентрації з розрідженням у пиловугільні котли для зменшення викидів оксидів азоту при згоранні органічного палива.

Тема: Зменшення викидів оксидів азоту при згоранні органічного палива

Назва: система подачі пилу високої концентрації з розрідженням.

Суб'єкт замовлення: ТЕС.

Об'єкт дослідження: метод зменшення викидів оксидів азоту в пиловугільних котлах на основі системи подачі в факел пилу високої концентрації для створення ефекту ступінчатого спалювання за рахунок затягнутого сумішоутворення на початковому частині факелу при обмеженому доступі кисню і зменшенні швидкості як запиленого потоку, так і другорядного повітря.

Місце розробки B2B модель. Оскільки виробництво спрямовано на виробництво.

Таблиця 5.1 – Плановий обсяг продукції по місяцям на перший рік

	Січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	Вересень	жовтень	листопад	грудень
Запланований обсяг, шт	8	10	10	15	15	15	15	15	15	12	10	10

Продукт – система подачі в факел пилу високої концентрації з розрідженням

Технологія нестандартна тим, що для зменшення викидів оксиду азоту дозволяє створити ефект ступінчатого згорання при обмеженому доступі кисню.

Крім цього перехід на дану систему з паровим інжектором дозволить використовувати попередню термообробку вугільного пилу в потоці пара при температурі близько 400°C.

Джерела сировини. Для виготовлення система подачі в факел пилу високої концентрації з розрідженням використовуються наступні компоненти: компресор (Україна), Паровий інжектор (Україна), живильник вугілля (Німеччина).

Кваліфікація персоналу. Розробники та технологи мають вищу освіту за напрямом «Енергетичне машинобудування». Спеціаліст з автоматизації має вищу освіту технічного спрямування. Робітники мають повну середню освіту. Бухгалтер має вищу освіту економічного напрямку.

Споживачами є ТЕС.

Ринок збуту: Проблема викидів оксиду азоту є досить актуальною у світі. Вони впливають на знищення озонового шару та захворюванням дихальних шляхів.

Конкурентні переваги. Однією з основних тенденцій розвитку сучасної техніки і технології є розробка і широке використання принципово нових технологічних і створення нових матеріалів зі специфічними властивостями. З збільшенням потужності і габаритів котлів вихід оксидів азоту збільшується. Тому задача створення котлів більш теплової потужності і з малим виходом оксидів азоту вирішується простіше всього шляхом використання технологій систем подачі пилу високої концентрації з розрідженням для створення ефекту ступінчатого спалювання за рахунок затягнутого сумішоутворення на початковому частині факелу при обмеженому доступі кисню і зменшенні швидкості як запиленого потоку, так і другорядного повітря. Крім цього перехід на дану систему з паровим інжектором дозволить використовувати попередню термообробку вугільного пилу в потоці пара при температурі близько 400°C.

Вибір напрямку проведення досліджень щодо впровадження технології зменшення викидів оксиду азоту залежить від збільшення використання вугілля в ТЕС так як потреба електроенергії з кожним роком збільшується.

Вартість розробки. На витратні матеріали буде витрачено близько 210 тис. грн, на роботу розробників – 30 тис. грн. Таким вартість розробки складатиме 340 тис. грн.

Ринкова ціна складатиме близько 290 тис. грн/шт.

Період повернення капіталовкладень – 4,1 роки.

5.2 Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища старт-апу

Таблиця 5.2 – Загрози і можливості зовнішнього середовища

Фактор	Загрози	Можливості
Економіка		
Нестабільність доходів	На початковому етапі, поки підприємство не набуло поширення, прибуток може бути не стабільним, що може призвести до затримки заробітних плат.	Для усунення фінансових проблем ми залучили інвесторів. По контракту, на початковому етапі, вони забезпечують нам підтримку. Тому нестабільність буде усунена.
Економічна криза	Політичні події які відбуваються в Україні спричинили економічну кризу, різку девальвацію гривні та невизначеність економічної ситуації в країні, розвивати підприємство стає досить складно.	Об'єктивно оцінюючи даний фактор, ми і залучили інвесторів з іншої країни. Підписаний контракт з Норвегією дає можливість спокійно чекати покращень у нашій країні.
Політика		
Нормативні вимоги, що до викидів оксидів азоту	Не можна виключати можливість змін в законодавстві. З часом вимоги до викидів шкідливих речовин на ТЕС можуть бути змінено.	Ми ведемо чітке слідування нормам технології, і готові звітувати перед будь-яким органом. Технологи постійно працюють над модернізацію, тому внесення корективів, відповідно до нових норм.
Державні реформи	Бізнесу часто обіцяють сприяння та допомогу від держави. Та насправді при прийнятті політичних рішень потреби, що до безпеки українців часто ігноруються.	Так як основна проблема та концепція сталого розвитку, що до екології передбачає зменшення шкідливих викидів речовин, буде залучено міжнародні організації захисту навколишнього середовища та за їх сприянням буде фінансова допомога.

Продовження таблиці 5.2.

Науково-технічний прогрес		
Поява нових технологій	Наука не стоїть на місці, кожного дня розробляють нові технології. Є можливість появи більш ефективного методу.	До того часу, як у нас з'явиться вагомий конкурент, ми вже досить міцно закріпимося на ринку та набудемо базу постійних клієнтів. Також технологи слідкують за новинками та впроваджують їх у свої розробки.
Перехід на альтернативні джерела енергії	Так як світ переходить на альтернативні джерела енергії з причин їх меншої екологічної небезпеки, з часом вони можуть витиснути інші способи отримання енергії.	Дана технологія зменшить викиди оксидів азоту до прийнятних норм, з часом можливо розроблення новітніх технологій для запобігання цієї проблеми. ТЕС є одним з основних джерел енергії.

Таблиця 5.3 – Аналіз факторів зовнішнього оперативного середовища

Фактор	Переваги	Недоліки
Постачальники		
Вузьке коло постачальників	Аналіз ринку показує, що є альтернативні варіанти придбання комплектуючих. У разі виникнення проблем з постачальниками ми зможемо знайти заміну.	Надто вузьке коло постачальників, що може в ряді випадків утворювати небажану залежність бізнесу.
Конкуренти		
Конкурентна спроможність на ринку	Дана технологія є універсальною майже для всіх пилувугільних котлів. Основною особливістю даної технології є об'єднання основних способів зменшення оксидів азоту.	Надання переваги традиційним методам.
Клієнти		
Консервативність клієнтів	Ефективність нашого методу дозволить показати те, що використання даної технології не вплине на продуктивність і дозволить підприємствам придержуватись нормам охорони праці та охорони навколишнього середовища. Розпочавши, ми зможемо продемонструвати, що нашу технологію не тільки можна, але й потрібно використовувати.	Не довіра споживачів до нових технологій. Надання переваги традиційним методам.

Таблиця 5.4 – Переваги і недоліки внутрішнього середовища

Фактор	Переваги	Недоліки
Необхідність придбання нового обладнання	Дане обладнання може використовувати для створення як системи так і розхідних матеріалів у майбутньому	Нове обладнання буде займати дуже багато місця. Для цього потрібен буде новий цех.
Високий рівень автоматизації. Виробництво складається з декількох етапів, кожен з яких автоматизовано	Точне та швидке моделювання приладів, їх налаштування і програмування. Як наслідок – висока продуктивність виготовлення, що дозволяє уникнути простою обладнання.	Високі капіталовкладення на початковому етапі. Необхідно тримати в штаті спеціаліста з автоматизації.
Для кожного замовника необхідно окремо підбирати додаткове обладнання. В залежності від типу котла.	Ми забезпечуємо високу якість та ефективність продукції для кожного замовника.	У випадку, якщо додаткове обладнання підібрано не точно, то продуктивність може знизитись, або навпаки, можна зашкодити роботі котла.
Технологи поєднують обов'язки інженерів, технологів та розробників	Технологи з легкістю можуть замінити один одного у випадку хвороби, відпустки або відрядження.	У технологів недостатньо часу на розробку та модернізацію технології.
Робота з пиловугільними котлами	Система подачі пилу високої концентрації з розрідженням основа нашого методу. Вони надають можливість високоефективного зменшення викидів оксиду азоту без зменшення продуктивності електростанцій	Необхідність введення додаткових заходів з охорони праці, таких як індивідуальні засоби захисту робітників, додаткові заходи з пожежобезпеки. Робітникам необхідно проходити оцінку кваліфікації, задля уникнення надзвичайних ситуацій.
Висока вартість обладнання	Якісне обладнання, підвищує якість продукту, що позитивно впливає на «авторитет» підприємства.	Високі капіталовкладення на початковому етапі та уразі ремонтних робіт.

5.3 Ключові фактори успіху проекту за методом Шонфільда.

На підставі аналізу факторів зовнішнього і зовнішнього оперативного середовищ було визначено ключові фактори успіху системи подачі пилу високої концентрації з розрідженням. Під ключовими факторами успіху розглянемо ті, на які підприємство може самостійно впливати під час виробництва і реалізації продукту. Ключові фактори успіху надано у вигляді діаграми Шонфільда.

Таблиця 5.5 – Оцінки характеристики за методом Шонфільда

Характеристика	Коефіцієнт вагомості	Оцінка характеристик		
		Наша продукція	Конкурент А (рециркуляція димових газів)	Конкурент Б (не стехіометричне спалювання)
Продуктивність котлів	0,5	4	3	5
Корозія котлів	0,3	4	5	3
Викиди оксидів азоту	0,5	5	4	4
Трудомісткість	0,2	4	5	2
Ціна	0,5	3	4	5
Затрати на додаткове обладнання	0,3	5	3	2
Додаткова площа для обладнання	0,3	2	4	5
Потреба в обслуговуючому персоналі	0,2	4	5	2
Забруднення котла	0,3	5	4	1

З урахуванням коефіцієнту вагомості характеристики визначається бальна оцінка кожної характеристики для нашої продукції і для конкурентів, яку приведено у таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Оцінки характеристики з урахуванням коефіцієнту вагомості

Характеристика	Бальна оцінка характеристик		
	Наша продукція	Конкурент А	Конкурент Б
Продуктивність котлів	2	1,5	2,5
Корозія котлів	1,2	1,5	0,9
Викиди оксидів азоту	2,5	2	2
Трудомісткість	0,8	1	0,4
Ціна	1,5	2	2,5
Затрати на додаткове обладнання	1,5	0,9	0,6
Додаткова площа для обладнання	0,6	1,2	1,5
Потреба в обслуговуючому персоналі	0,8	1	0,4
Забруднення котла	1,5	1,2	0,3

На підставі отриманих бальних оцінок будується графік порівняння конкурентних переваг нашого підприємства з конкурентами.

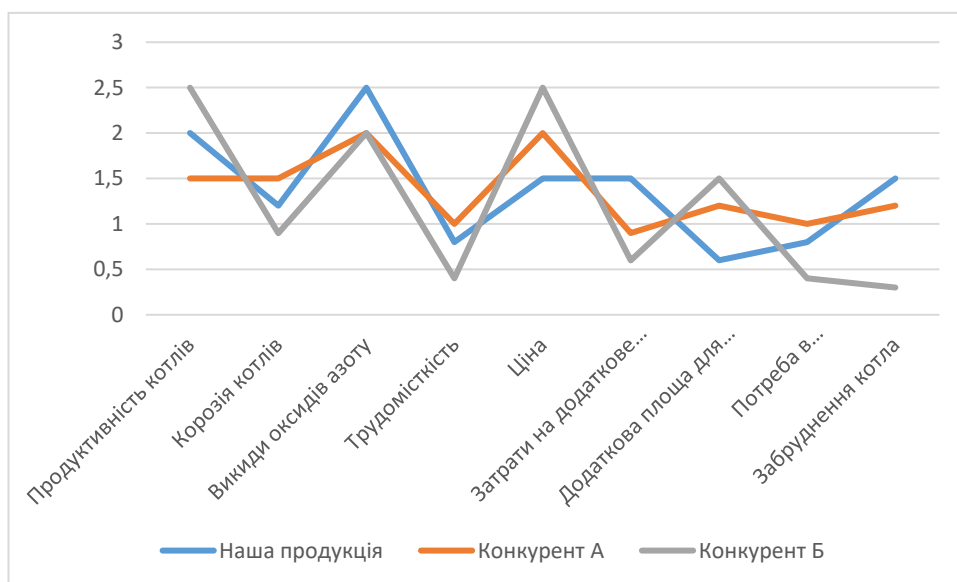


Рисунок 5.1 – Порівняння конкурентних переваг підприємства з конкурентами

Таким чином, бачимо, що наш продукт поступається конкурентам лише за вартістю і додатковою площею для обладнання. Але, за рахунок того, що наша технологія дозволяє тримати продуктивність котла на високому рівні, має менші викиди оксиду азоту, затрати на додаткове обладнання та забруднення котла, дана продукція виграє.

5.4 Розрахунок основних техніко-економічних показників проекту

Для розвитку даного стартап проекту було використано декілька джерел фінансування – власні та запозичені кошти. До власних коштів відносимо:

- заощадження, одержані від попередньої діяльності;
- формування на підприємстві фонду розвитку виробництва, науки і техніки шляхом відрахувань чітко обумовленого відсотку з доходу або прибутку підприємства протягом всього періоду функціонування.

А до запозичених коштів:

- іноземні інвестиції, а саме інвесторів з Норвегії. Так як Норвегія являється однією з екологічно чистих країн світу, інвестори зацікавлені в розвитку нових природоохоронних технологій.

На виробництві обов'язковими працівниками, які необхідні для виконання відповідного обсягу робіт і повної комплектації робочих місць протягом зміни, є: начальник зміни, апаратник, інженер та механік

Таблиця 5.7 – Персонал цеху

Посада	Кількість штатних одиниць, осіб	Зарплата на 1 прац., грн	Зарплата, грн
Начальник зміни	3	11000	33000
Інженер	3	10000	30000
Апаратник	3	9000	27000
Механік	3	8000	24000
Начальник цеху	1	15000	15000
Головний технолог	1	13000	13000
Бухгалтер	1	10000	10000
Прибиральниця	2	6500	13000
Сума		82500	165000

Розрахуємо фонд оплати праці:

$$\text{ФОП} = 12 \cdot \text{ЗП} = 12 \cdot 165\,000 \cdot 1,22 = 2\,415\,600 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Відрахування на соціальні заходи здійснюються за встановленим законодавством ставками від витрат на оплату праці і складає 22%.

Затрати на комплектуючі зручно привести у вигляді таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості комплектуючих для система подачі в факел пилу високої концентрації з розрідженням

Найменування	Норма витрат	Ціна, грн./шт	Сума витрат грн./рік
Компресор	150 шт/рік	15 000	2 250 000
Паровий інжектор	150 шт/рік	125 000	18 750 000
Живильник вугілля	150 шт/рік	70 000	10 500 000
Разом		31 500 000	

Річні затрати на комплектуючі: $Z_c = 31\,500\,000 \text{ грн./рік}$

Витрати на електроенергію. Розрахуємо витрати на електроенергію за нерегульованим тарифом, тариф за приєднану потужність: $T_{\text{пр}} = 2.5$ грн/кВт; Потужність обладнання: $H_{\text{об}} = 60$ кВт/т; Освітлення цілодобове: $H_{\text{ос}} = 30$ кВт/добу.

Підприємство працює 12 годин на добу, 250 днів на рік. Річні витрати на електроенергію:

$$Z_{e/e} = P_{\text{пр}} \cdot T_{\text{пр}} + T_{\text{нерег}} \cdot (H_{\text{об}} \cdot V_{\text{год}} + H_{\text{ос}} \cdot 250) \\ = 5000 \cdot 2.5 + 1 \cdot (60 \cdot 734,864 + 30 \cdot 250) = 64\,091,84 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Витрати на опалення цеху. Загальна площа: 1800 м^2 ; тарифна ставка на опалення: 33 грн./ м^2 міс; Сезон опалення: 6 місяців.

$$Z_{\text{опал.}} = 1800 \cdot 33 \cdot 6 = 356\,400 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Амортизаційні відрахування. Здійснюються за прийнятими методами і нормами.

Таблиця 5.9 – Розрахунок вартості ОЗ підприємства з система подачі в факел пилу високої концентрації з розрідженням

Найменування	Кількість одиниць	Вартість, грн.	Норма амортизації за рік, %
Склад	1	1 000 000	5
Цех (будівля)	1	1 150 000	5
Конвеєрна лінія	5	30 000	20
Контролер	10	20 000	20
Автоматизоване приладдя	1	500 000	30
Сертифікат		250 000	30
Транспорт (внутрішньо цеховий)	2	15 000	20
Виробничий інвентар		10 000	25

Сумарна вартість основних фондів:

$$\text{ОФ} = 1\,000\,000 + 1\,150\,000 + 30\,000 + 20\,000 + 500\,000 + 250\,000 + 15\,000 + 10\,000 \\ = 2\,975\,000 \text{ грн./рік}$$

Розраховуємо величину амортизаційних відрахувань:

$$A = (1\,000\,000 + 1\,150\,000) \cdot 0,05 + (30\,000 + 20\,000) \cdot 0,2 + (500\,000 + 250\,000) \cdot 0,3 + \\ 15\,000 \cdot 0,2 + 10\,000 \cdot 0,25 = 348\,000 \text{ грн.}$$

Сумарні цехові витрати наведено у таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Сумарні затрати цеху виробництва система подачі в факел пилу високої концентрації з розрідженням

Статті затрат	Затрати на річний випуск, грн./рік
Комплектуючі	31 500 000
Електроенергія	64 092
Опалення	356 400
Фонд оплати праці	2 415 600
Амортизація	348 000
Всього (собівартість)	34 684 092

Розрахунок ціни за основними методами ціноутворення:

1. Метод, орієнтований на витрати (витратний метод):

$$\text{Ц} = \frac{C}{150} + C \cdot 0,001\% = \frac{34\,684\,092}{150} + 34\,684\,092 \cdot 0,0001 = \\ = 234\,695,689 \text{ грн./шт}$$

2. Агрегатний метод – застосовується до товарів із складових елементів:

$$\text{Ц} = \text{Ц}_1 + \text{Ц}_2 + \dots + \text{Ц}_i = 20\,000 + 150\,000 + 80\,000 = 210\,000 \text{ грн./шт}$$

3. Параметричний метод – враховує вагомість якісних параметрів товару і оцінку цих параметрів споживачем:

$$\text{Ц}_{\text{нової моделі}} = \text{Ц}_{\text{базової моделі}} \cdot \frac{\text{Балова оцінка нової моделі}}{\text{Балова оцінка базової моделі}} = 290\,000 \cdot \frac{5}{4} \\ = 362\,500 \text{ грн./шт}$$

4. Метод ціноутворення на основі поточних цін або конкурентний метод.

Було проведено аналіз цін на товари конкурентів. А саме, конкурент А – ціни коливаються в діапазоні від 150 000 до 350 000 грн. Конкурент Б – від 120 000 до 325 000 грн.

Отже, для нашого продукту ціна може коливатися від 290 000 до 320 000 грн. І саме з такими цінами продукція на ринку може бути конкуренто спроможною.

5. Баловий метод.

Визначимо ціна одного балу:

$$\text{Ц}' = \frac{\text{Ц}_{\text{базової моделі}}}{\sum(\text{Б}_{\text{бі}} \cdot V)_i} = \frac{290000}{12,3} = 23\,577,24$$

Визначимо ціну нового виробу:

$$\text{Ц} = \sum(\text{Б}_{\text{Ні}} \cdot V_i) \cdot \text{Ц}' = 12,4 \cdot 23\,577,24 = 292\,357,724 \text{ грн/шт}$$

Ціна реалізації кінцевої продукції, розрахуємо ціну річного випуску продукції:

$$\text{В}_{\text{рік}}^{\text{грн}} = \text{Ц} \cdot \text{В}_{\text{рік}} = 292\,000 \cdot 150 = 43\,800\,000 \text{ грн}$$

Визначаємо прибуток підприємства:

$$\text{П} = \text{В}_{\text{рік}}^{\text{грн}} - \text{С} = 43\,800\,000 - 34\,684\,092 = 9\,115\,908 \text{ грн}$$

Рентабельність підприємства:

$$\text{Р} = \frac{\text{П}}{\text{С}} \cdot 100\% = \frac{9\,115\,908}{34\,684\,092} \cdot 100 = 26,3 \%$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$\text{Е} = \frac{\text{П}}{\text{К}} = \frac{\text{П}}{\text{ОФ} + \text{ОбФ}} = \frac{9\,115\,908}{2\,975\,000 + 34\,171\,092} = 0,245$$

$$\text{ОбФ} = \text{С} - \text{А} - \text{ЗП} = 34\,684\,092 - 348\,000 - 165\,000 = 34\,171\,092 \text{ грн.}$$

Період повернення капіталовкладень:

$$\text{T}_{\text{пов.}} = \frac{1}{\text{Е}} = \frac{1}{0,245} = 4,1 \text{ р.}$$

Фондовіддача основних засобів виробництва:

$$\text{ФВ} = \frac{\text{В}_{\text{рік}}^{\text{грн}}}{\text{ОФ}} = \frac{43\,800\,000}{2\,975\,000} = 14,72 \text{ грн/грн}$$

Фондоємність:

$$\Phi\epsilon = \frac{1}{\Phi\text{В}} = \frac{1}{14,72} = 0,068$$

Зведемо всі розраховані в розділі 4 показники до таблиці 10

Розрахуємо точку беззбитковості.

Розрахуємо собівартість продукції за витратами, враховуючи витрати на технічне обслуговування обладнання (на технічне обслуговування обладнання ми заклали таку ж суму, яка йде на виготовлення однієї одиниці продукції). На 150 штук ми витрачаємо комплектуючих на 34 684 092 грн, тобто на одну одиницю продукції ми витрачаємо 231 227,28 грн.

Позначимо точку беззбитковості через X у штуках. Витрати за рік складатимуть:

$$2\,975\,000 + 2\,415\,600 + 64\,092 + 356\,400 + 231\,227,28 * X = 292\,000 * X$$

$$60\,772,72 * X = 5\,811\,092$$

$$X = 95,6.$$

Точка беззбитковості – 96 шт/рік

Таблиця 5.11 – Основні техніко - економічні показники цеха з виробництва системи подачі в факел пилу високої концентрації з розрідженням

Показник	Значення
Вартість основних фондів	2 975 000 грн.
Річний випуск	150 шт
Чисельність персоналу	17 осіб
Капіталовкладення	37 146 092 грн.
Собівартість продукції	34 684 092 грн./рік
Ціна продукції	292 000 грн./шт.
Прибуток	9 115 908 грн./рік
Рентабельність	26,3 %
Коефіцієнт економічної ефективності	0,245
Період повернення капіталовкладень	4,1 років
Фондовіддача	14,72 грн./грн.
Фондоємність	0,068 грн./грн.

За знайденими техніко-економічними показниками можна зробити висновок, що дане підприємство є прибутковим.

5.5 Оцінка ризиків та страхування розробки.

Розглянемо основні ризики, які можуть мати місце для нашого підприємства.

1. Ринковий ризик: ринок є абсолютно новим для України.

Страхування: дана технологія є кращою альтернативою традиційним технологіям. У випадку, якщо в Україні дана продукція не буде використовуватися, ми можемо працювати з ТЕС в інших країнах світу.

2. Ризик конкуруючих технологій: існує можливість, що якась фірма створить технологію та продукт, аналогічні нашим.

Страхування: ринок є досить великим і на перших порах ми практично не будемо з ними конкурувати

3. Ризик завершення або технічний ризик: технологія надійна, аналогічні системи застосовуються у деяких країнах Європи.

Страхування: наші технологи не стоять на місці. Постійно йдуть експерименти та удосконалення технології.

4. Політичний ризик: в майбутньому можуть бути прийняті нові нормативно-правові акти по очистці води.

Страхування: ведеться чітке слідування нормам технології, і ми готові звітувати перед будь-яким органом. Погіршення торгових відносин з країнами-постачальниками нашої сировини не передбачується, оскільки це надійні торгові партнери України.

5. Ризик капітальних вкладень: існує ризик різкого підйому ціни на імпорту сировину.

Страхування: з постачальниками ми заключимо контракти, згідно яких зможемо платити через деякий час після отримання продукції. Таким чином на

момент різких валютних коливань у нас ще буде запас сировини, закупленої за старою ціною, і ми зможемо наперед реалізовувати продукцію по вищій ціні.

6. Ризик втрати майна. Робота з високими напругами, робить наше підприємство пожежонебезпечним.

Страхування: підприємство обладнане необхідним вентиляційним та протипожежним обладнанням.

До більшості ризиків ми готові, і суттєвих втрат не понесемо. Єдиний реальний ризик – це пожежа або вибух, тому ми застрахуємо підприємство від вибухів та пожеж.

5.6 Карта бізнес процесів використання стартап проект

Таблиця 5.12 – Карта бізнес процесів

Стадія реалізації стартап проекту	Бізнес-процеси	Характеристики		
		Задіяні ресурси	Орієнтовна тривалість процесу	Верхня межа фінансових витрат
Розробка ідеї стартапу	Пошук інформації Аналіз ринку Аналіз конкурентів	Інтернет Комп'ютер Людина Електроенергія	1 місяць	5000 грн
Реалізація ідеї	Формування компонентів Аналіз обладнання Закупівля обладнання	Людина Інтернет Комп'ютер Електроенергія	1 місяць	Виробничий інвентар - 10 000 Виробниче обладнання – 2 965 000
Впровадження у постачання	Організація робочого циклу Залучення покупців	Людина Комп'ютер Виробниче обладнання Електроенергія	1 місяць	292 500 грн
Масова реалізація	Розробка реклами Прийом замовлень та надання послуг	Людина Інтернет Комп'ютер	протягом робочого часу	10 000 грн

Таблиця 5.13 – Системний аналіз бізнес процесів стартапу

Функції	Елементи		
	Автор ідеї	Інженер-технолог	Механік
Пошук інформації	+	+	
Узагальнення тематики	+	+	
Аналіз ринку	+	+	+
Визначення ціни	+	+	
Закупка обладнання	+	+	+
Реклама	+		
Організація робочого процесу	+	+	
Створення каталогу	+		
Прийом замовлень	+		
Пошук покупців проекту	+	+	+
Ведення обліку	+	+	
Розрахунок покупців	+		
Аналіз потреб споживачів	+	+	+
Контроль якості обслуговування	+	+	+

5.7 Аналіз ризиків

Так як кожен новий проект неминуче стикається на своєму шляху з певними труднощами, які загрожують його здійсненню, то для його успішної реалізації необхідно:

- Виявити відповідні фактори ризику;
- Розробити заходи, спрямовані на уникнення та зведення до мінімуму ризиків.

Головне в аналізі ризиків - вміння підприємства заздалегідь передбачити всі типи ризиків, з якими є ймовірність зіткнутися, визначення джерела цих ризиків і момент їх виникнення, а разом з тим розробка заходів щодо скорочення цих ризиків і мінімізації втрат, які вони можуть викликати. Для запобігання ризиків або зменшення їх впливу розроблені наступні заходи, які наведені в таблиці 5.12 та 5.13.

Таблиця 5.14 – Ризики інноваційної розробки та ймовірність їх настання

Стадія реалізації	Види ризику	Характеристика	Ймовірність настання	Вплив на результат
Розробка ідеї стартапу	Пошук інформації	Знаходження неправдивої інформації	Мінімальна	Проблеми на початковому етапі створення підприємства
	Аналіз ринку	Неправильний або некоректний аналіз ринку	Середня	Встановлення некоректних цін на продукт.
	Аналіз конкурентів	Неправильний або недостовірний аналіз конкурентів	Середня	Встановлення некоректних цін, неправильна оцінка конкурентоспроможності
Реалізація ідеї	Формування компонентів	Неправильне формування компонентів	Мінімальна	Неправильна компонентна база
	Аналіз обладнання	Некоректний аналіз обладнання	Мінімальна	Можливість помилитись із можливостями і функціоналом обладнання
	Закупівля обладнання	Закупівля неякісного обладнання або переплата	Мінімальна	Закупка невідповідного обладнання в результаті чого працювати з ним неможливо або складно
Впровадження у постачання	Організація робочого циклу	Некоректна організація робочого циклу	Мінімальна	Неправильно організований робочий цикл зменшує продуктивність надання послуг або сильно ускладнює його
	Залучення покупців	Погане залучення покупців	Середня	Ненадійні покупці можуть зашкодити підприємству
Масова реалізація	Розробка реклами	Неякісна реклама	Середня	Слабке або негативне рекламування сповільнює розвиток компанії
	Прийом замовлень та надання послуг	Погана якість обслуговування	мінімальна	Погана робота робітників може знизити якість виконаної роботи а погана робота обслуговуючого персоналу може знизити бажання клієнтів обслуговуватись в даній компанії

Найважливішими ризиками являються : неправильний або некоректний аналіз ринку, неправильний або недостовірний аналіз конкурентів, Закупівля неякісного обладнання або переплата, погане залучення покупців, неякісна реклама. В таблиці 5.15 вказані методи боротьби з цими ризиками.

Таблиця 5.15 – Методи управління ризиками

Ризики	Методи управління ризиками	Приклад методу
Неправильний або некоректний аналіз ринку	Ухилення від ризику	Відмова від прийняття ризикованих проектів, рішень.
Неправильний або недостовірний аналіз конкурентів	Попередження ризику	Здобуток додаткової інформації Стратегічне планування діяльності Прогнозування економічної ситуації Активний маркетинг
Закупівля неякісного обладнання або переплата	Попередження ризику	Зниження частоти збитку Зменшення розмірів збитку Здобуття додаткової інформації
Погане залучення покупців	Попередження ризику	Стратегічне планування діяльності Прогнозування економічної ситуації Цілеспрямований маркетинг.
Неякісна реклама	Ухилення від ризику	Відмова від ненадійних партнерів

5.8 Висновок за розділом

У розділі був розроблен стартап-проект, описана установка, визначена бізнес-ідея, суб'єкт замовлення та об'єкт дослідження. Проаналізоване зовнішнє, оперативне та внутрішнє середовище стартапу, описані фактори, недоліки та переваги. Визначені ключові фактори успіху, проведено порівняння конкурентів. Розраховані основні техніко-економічні показники, визначена ціна та проаналізовані результати розрахунків. Проведена оцінка ризиків та запропоновані методи страхування проекту.

ВИСНОВОК

1. Проведено теоретичний і розрахунковий аналіз використаних в розрахунковій практиці кінетичних схем хімічних реакцій утворення оксидів азоту;
2. Проведено математичне моделювання генерації оксидів азоту при спалюванні пилоподібного палива;
3. Розроблено програмний продукт для математичного моделювання процесу утворення оксидів азоту при спалювання органічного палива;
4. Проведено моделювання утворення оксидів азоту у котлі ТПП-210а з використання спеціалізованого пакету;
5. Розроблено стартап-проект, що до використання технології зменшення викидів оксиду азоту при спалюванні органічного палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. [Текст]/ М.: Энергоатомиздат, 1987. - 144 с.
2. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. [Текст]/ 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Недра, 1988. - 321 с.
3. Егорова Л.Е., Росляков П.В., Буркова А.В., Чжун Б. Математическое моделирование и расчет эмиссии токсичных продуктов сгорания органических топлив [Текст]/ Теплоэнергетика. - 1993. - № 7. - С. 63-68.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. [Текст]/ М.: Энергоатомиздат, 1981. - 152 с.
5. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: справочник в 2 ч. пер. с англ. [Текст] / Под ред. С. Карверта, Г.М. Инглунда. - М.: Металлургия, 1988. Ч. 1.-760 с.
6. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС: учебник. [Текст]/ М.: Энергоатомиздат, 1992. - 240 с.
7. Беликов С.Е., Котлер В.Р. Снижение вредных выбросов в атмосферу от пылеугольных котлов промышленной ТЭЦ [Текст]/ Теплоэнергетика. - 2001. № 9. - С. 49-52.
8. Внуков А.К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов / А. К. Внуков. - М.: Энергоиздат, 1981. - 296 с.
9. Котлер В.Р. Выбросы оксидов азота при совместном сжигании угля с газом или мазутом [Текст]/ Теплоэнергетика. - 1996. - № 4. - С. 47-52.
10. Ю. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль [Текст]/ Под ред. Е.Н. Теверовского. - М.: Мир, 1980. - 540 с.
11. П. Гаврилов А.Ф. Уменьшение вредных выбросов при очистке паровых котлов. [Текст]/ М.: Энергоатомиздат, 1990. - 240 с.
12. Зельдович Б.Я., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении [Текст]. - М.: Наука, 1947. - 146 с.

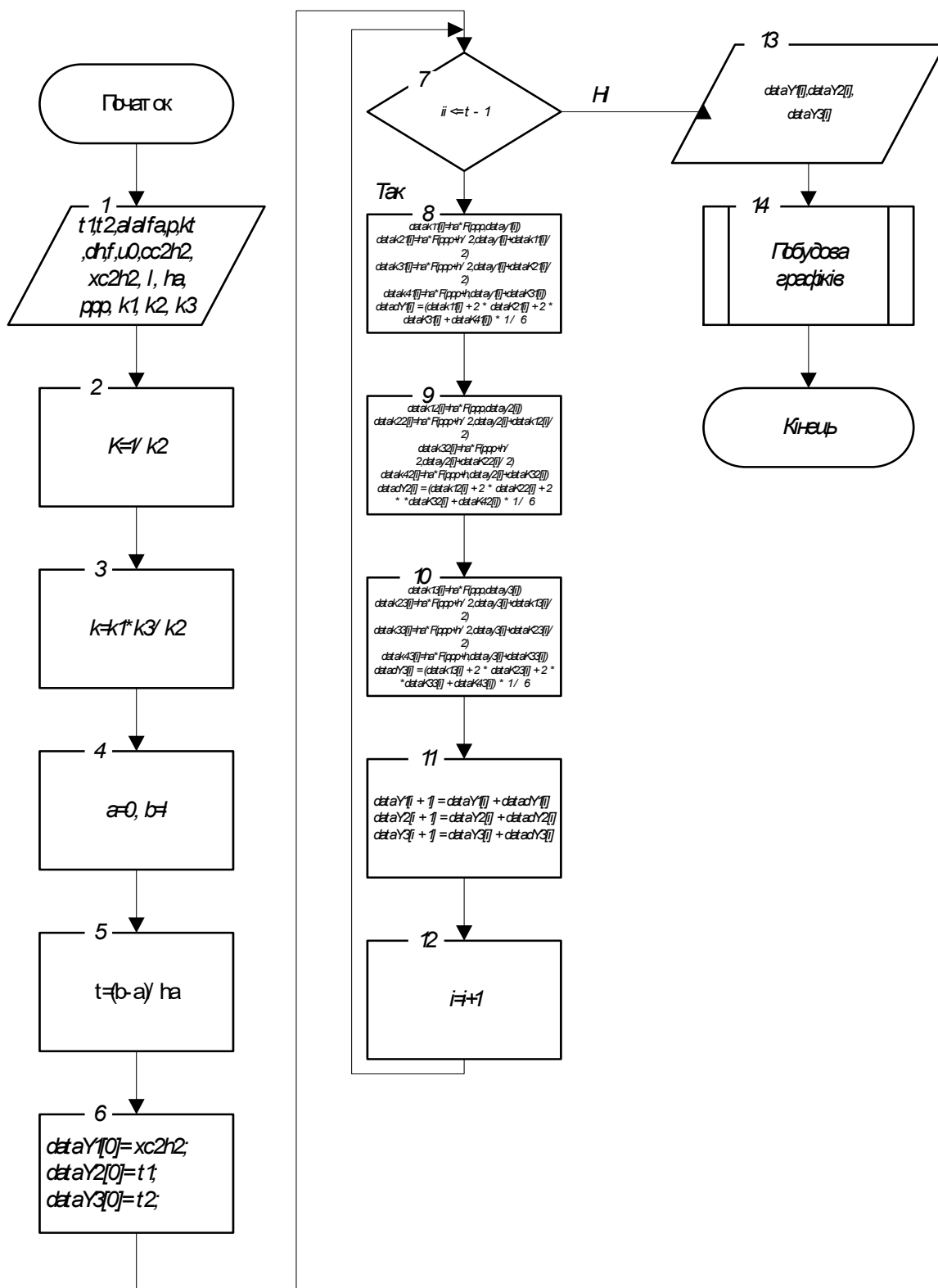
13. Природоохранные технологии на ТЭС и АЭС. Защита атмосфера от вредных выбросов ТЭС и АЭС: учебное пособие. [Текст] / А.С. Носков, З.П. Пак, В.В. Саломатов. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. - 203 с.
14. Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод [Текст]/ Энергия. - 1973. - С. 152-156.
15. Росляков П.В. Расчет образования топливных оксидов азота при сжигании азотсодержащих топлив [Текст]/ Теплоэнергетика. - 1986. - № 1. - С. 37-41.
16. Буров Д.В., Биленко В.А., Черноковский В.З. Сравнительный анализ динамики исследуемых вариантов регулирования NOx // Теплоэнергетика. 1994.-№7. -С. 68-76.
17. Fenimore CP. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames. [Текст]/ Combustion and Flames. - 1972. - P. 102.
18. Harries R.S., Nafall M., Williams A. A. Formation on oxides of nitrogen in high temperature CH₄-O₂-N₂-flame [Текст]/ Combustion Science and Technology. 1976.-№1.-P. 85-91.
19. Титов СП., Бабий В.И., Барбараш В.М. Исследование образования NOx при горении пыли каменных углей [Текст]/ Теплоэнергетика. - 1980. - № 3. С. 64-67.
20. Яворский И.А. О путях предотвращения выбросов оксидов азота технологическими методами сжигания твердых топлив [Текст]/ Теплоэнергетика. - 1992. - № 2. - С. 17-23.
21. Росляков П.В., Егорова Л.Е., Чжун Б. Принципы стадийного горения твердых топлив, обеспечивающие минимальный выход оксидов азота [Текст]/ Теплоэнергетика. - 1991. - № 12. - С 51-54.
22. Козлова С.Г, Кухто В.А., Потепалова И.П. и др. Образование вредных выбросов при горении экибастузского угля [Текст]/ Горение органического топлива: материалы конф. - Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. 1.2.-С. 284-288.
23. Стаднік В. А., Безносик Ю. О. Математичне моделювання викидів оксидів азоту при згоранні органічного палива. [Текст]// VII Міжнародна

- конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології, 11-13 квітня 2018 – Збірка тез доповідей учасників – Київ, 2018. – с. 200.
- 24.Стаднік В. А., Безносик Ю. О. Моделювання утворення оксидів азоту при згоранні органічного палива. Шоста міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ2018», Київ 16-18 травня 2018 року. ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ. – Київ, 2018. – с. 234-237.
- 25.Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. [Текст]/ М.: Энергоатомиздат, 1988. - 528 с.
- 26.Енякин Ю.П., Котлер В.Р., Бабий В.И., Штальман С.Г., Щербаченко СИ. Работы ВТИ по снижению выбросов оксидов азота техническими методами [Текст]/ Теплоэнергетика. - 1991. - № 6. - С. 33-38.
- 27.Будилов О.И., Заворин А.С. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции. [Текст]/ Томск: Издательство «Красное знамя», 1991.-100 с.
- 28.Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Численные модели динамики и горения аэрозмесей в каналах. [Текст]/ Томск: Изд-во ТГУ, 1998. - 236 с.
- 29.Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. [Текст]/ М.: Наука, 1991. - 320 с.
- 30.Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during coal combustion [Текст]/ AIChE Journal. - 1982. - Vol. 28. - № 2. - P. 302-311.
- 31.Гусев И.Н., Зайчик Л.И., Кудрявцев Н.Ю. Моделирование образования оксидов азота в топочных камерах [Текст]/ Теплоэнергетика. - 1993. - № 1. С. 32-36.
- 32.Безгрешнов А.Н., Липов Ю.М., Шлейфер Б.М. Расчет паровых котлов. М. [Текст]/ Энергоатомиздат, 1991. -240 с.
- 33.Красинский Д.В., Саломатов В.В. Численное моделирование процессов факельного сжигания пылеугольного топлива и образования NO_x в

- вихревой топке [Текст]/ Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность. — Новосибирск: НГТУ, 2000. - Вып. 1. - С. 24-36. 42
- 34.Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. [Текст]/ Томск: Раско, 1992. - 271 с.
- 35..Старченко А.В, Заворин А.С., Красильников СВ. Применение пакета Fire 3D к анализу процессов шлакования // Известия Томского политехнического университета. - 2002. - Т. 305. - № 2. - С. 152-157
- 36.De SoeteG.G. Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen. [Текст]// Fifteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh. - 1975. -P. 1093-1102.

ДОДАТОК А

Блок-схема обчислювального модуля



ДОДАТОК Б

```

double F(double x, double y, double xC2H2, double alfa, double p, double cc2h2, double u0,
double K, double k){
    return (k*((1 - y)*(alfa - y)*p*p) / (((1 + alfa - y)*((K + (K +
p)*(alfa - y)))))) / (cc2h2*u0));
}
double F1(double x, double y, double xC2H2, double alfa, double p,
double cc2h2, double u0, double K, double k, double kt, double f, double t1, double t2,
double dh){
    return (dh*(k*((1-xC2H2)*(alfa-xC2H2)*p*p)/((1+alfa-
xC2H2)*((K+(K+p)*(alfa-xC2H2)))))/((cc2h2*u0*((0.3178*alfa*-0.1616+0.4660)/(1+alfa-
xC2H2)))))-kt*f*(y-t2);
}
double F2(double x, double y, double kt, double f, double t1, double
t2){
    return (kt*f*(t1 - y));
}
private: System::Void button2_Click(System::Object^ sender, System::EventArgs^ e) {
    // Зчитування з форми значень змінних
    double C = double::Parse(textBox7->Text), O = double::Parse(textBox8->Text), N
= double::Parse(textBox9->Text), Q = double::Parse(textBox11->Text), V =
double::Parse(textBox3->Text);
    double t1 = double::Parse(textBox2->Text), t2 = double::Parse(textBox1->Text),
ht = double::Parse(textBox12->Text), o21 = double::Parse(textBox13->Text), o2 =
double::Parse(textBox14->Text);
    double ho = double::Parse(textBox17->Text), r2 = double::Parse(textBox15-
>Text), htt = double::Parse(textBox16->Text);
    double r = 0;
    //Кількість кроків
    int s = (t2 - t1) / ht;
    int ss = (r2 - r) / htt;
    int sss = (o2 - o21) / ho;

    Таблиця = gcnew DataTable();
    Таблиця1 = gcnew DataTable();
    Таблиця2 = gcnew DataTable();
    dataGridView1->DataSource = Таблиця;
    dataGridView2->DataSource = Таблиця1;
    dataGridView3->DataSource = Таблиця2;
    // Назва стовпчиків таблиці
    Таблиця->Columns->Add("Час с.");
    Таблиця->Columns->Add("Концентрація NO[1] %");
    Таблиця->Columns->Add("Концентрація NO[2] %");
    Таблиця1->Columns->Add("Температура згорання K");
    Таблиця1->Columns->Add("Концентрація NO[1]%");
    Таблиця1->Columns->Add("Концентрація NO[2]%");
    Таблиця2->Columns->Add("Концентрація O2%");
    Таблиця2->Columns->Add("Концентрація NO[1]%");
    Таблиця2->Columns->Add("Концентрація NO[2]%");
    // Очищення графіків
    chart1->Series["Концентрація NO[1]"]->Points->Clear();
    chart2->Series["Концентрація NO[1*]"]->Points->Clear();
    chart3->Series["Концентрація NO[1**]"]->Points->Clear();
    chart1->Series["Концентрація NO[2]"]->Points->Clear();
    chart2->Series["Концентрація NO[2*]"]->Points->Clear();
    chart3->Series["Концентрація NO[2**]"]->Points->Clear();
    // Задання назви графіку
    chart1->Titles->Add("Динаміка утворення NO");
    chart2->Titles->Add("Залежність утворення NO від температури згорання");
    chart3->Titles->Add("Залежність утворення NO від концентрації O2");
    // Увімкнення легенди
    chart1->Series["Концентрація NO[1]"]->IsVisibleInLegend = true;
    chart1->Series["Концентрація NO[2]"]->IsVisibleInLegend = true;

```

[illegible]

```

array<double>^ data3K41(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K51(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3dY1(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3X2(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3Y2(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3Y12(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3k12(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K22(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K32(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K42(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K52(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3dY2(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3X3(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3Y3(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3Y13(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3k13(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K23(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K33(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K43(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3K53(gcnew array<double>(sss + 1));
array<double>^ data3dY3(gcnew array<double>(sss + 1));
dataY1[0] = N*0.0014;
dataY2[0] = N*0.0045;
dataY3[0] = N*0.0021;
for (int i = 0; i <= s - 1; i++)
{
    double k1 = 1.94 * pow(10, 15)*exp(-39456 / (8.31*t1)), k2 = 3.48 *
pow(10, 20)*exp(-50327 / (8.31*t1)), k3 = 6.9*pow(10, -6)*exp(21137 / (8.31*t1)), k4 = 6.22
* pow(10, 14)*exp(-27678 / (8.31*t1));
    double k5 = pow(10, 14), k6 = 1.31 * pow(10, 5)*exp(-17111 /
(8.31*t1)), k7 = 3600 * exp(-311102 / (8.31*t1)), k8 = 7.8 * pow(10, 10)*exp(-37997 /
(8.31*t1));
    double k9 = 1.4 * pow(10, 6)*t1*exp(-3150 / (8.31*t1)), k10 = 1.69 *
pow(10, 10), k11 = 1.4 * t1* pow(10, 15)*exp(-19275 / (8.31*t1));
    datak11[i] = ht*F(t1, dataY1[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2, u0, K, k);
    datak21[i] = ht*F(t1 + ht / 2, dataY1[i] + datak11[i] / 2, dataY1[i],
alfa, p, cc2h2, u0, K, k);
    datak31[i] = ht*F(t1 + ht / 2, dataY1[i] + dataK21[i] / 2, dataY1[i],
alfa, p, cc2h2, u0, K, k);
    dataK41[i] = ht*F(t1 + ht, dataY1[i] + dataK31[i], dataY1[i], alfa, p,
cc2h2, u0, K, k);
    dataK51[i] = ht*F(t1 + ht, dataY1[i] + dataK31[i], dataY1[i], alfa, p,
cc2h2, u0, K, k);
    datadY1[i] = (datak11[i] + 2 * dataK21[i] + 2 * dataK31[i] +
dataK41[i]) * 1 / 6;

    datak12[i] = ht*F1(t1, dataY2[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2, u0, K, k,
kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
    dataK22[i] = ht*F1(t1 + ha / 2, dataY2[i] + datak12[i] / 2, dataY1[i],
alfa, p, cc2h2, u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
    dataK32[i] = ht*F1(t1 + ha / 2, dataY2[i] + dataK22[i] / 2, dataY1[i],
alfa, p, cc2h2, u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
    dataK52[i] = ht*F1(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
    dataK42[i] = ht*F1(t1 + ha, dataY2[i] + dataK32[i], dataY1[i], alfa, p,
cc2h2, u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
    datadY2[i] = (datak12[i] + 2 * dataK22[i] + 2 * dataK32[i] +
dataK42[i]) * 1 / 6;

    datak13[i] = ht*F2(t1, dataY3[i], kt, f, dataY2[i], dataY3[i]);
    dataK23[i] = ht*F2(t1 + ha / 2, dataY3[i] + datak13[i] / 2, kt, f,
dataY2[i], dataY3[i]);

```

```

        dataK33[i] = ht*F2(t1 + ha / 2, dataY3[i] + dataK23[i] / 2, kt, f,
dataY2[i], dataY3[i]);
        dataK43[i] = ht*F2(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
        dataK53[i] = ht*F2(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
        datadY3[i] = (dataK13[i] + 2 * dataK23[i] + 2 * dataK33[i] +
dataK43[i]) * 1 / 6;

        dataY1[i + 1] = dataY1[i] + datadY1[i];
        dataY2[i + 1] = dataY2[i] + datadY2[i];
        dataY3[i + 1] = dataY3[i] + datadY3[i];
        Таблиця1->Rows->Add();

        dataGridView1[0, i]->Value = s.ToString("F1");
        dataGridView1[1, i]->Value = dataY1[i].ToString("F3");
        dataGridView1[2, i]->Value = dataY2[i].ToString("F3");
        dataGridView1[3, i]->Value = dataY3[i].ToString("F3");
        s += ht;
        Таблиця1->Rows->Add();
        dataGridView1[0, i]->Value = s;
        dataGridView1[1, i]->Value = fe[i];
        dataGridView1[2, i]->Value = ff[i];
        chart1->Series["Концентрація NO[1]"]->Points->AddXY(fd[i], fe[i]);
        chart1->Series["Концентрація NO[2]"]->Points->AddXY(fd[i], ff[i]);
    }
    dataK11[i] = ht*F(t1, dataY1[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2, u0, K, k);
    dataK21[i] = ht*F(t1 + ht / 2, dataY1[i] + dataK11[i] / 2, dataY1[i], alfa, p,
cc2h2, u0, K, k);
    dataK31[i] = ht*F(t1 + ht / 2, dataY1[i] + dataK21[i] / 2, dataY1[i], alfa, p,
cc2h2, u0, K, k);
    dataK41[i] = ht*F(t1 + ht, dataY1[i] + dataK31[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2,
u0, K, k);
    dataK51[i] = ht*F(t1 + ht, dataY1[i] + dataK31[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2,
u0, K, k);
    datadY1[i] = (dataK11[i] + 2 * dataK21[i] + 2 * dataK31[i] + dataK41[i]) * 1 /
6;

    dataK12[i] = ht*F1(t1, dataY2[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2, u0, K, k, kt, f,
dataY2[i], dataY3[i], dh);
    dataK22[i] = ht*F1(t1 + ha / 2, dataY2[i] + dataK12[i] / 2, dataY1[i], alfa,
p, cc2h2, u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
    dataK32[i] = ht*F1(t1 + ha / 2, dataY2[i] + dataK22[i] / 2, dataY1[i], alfa,
p, cc2h2, u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
    dataK52[i] = ht*F1(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
    dataK42[i] = ht*F1(t1 + ha, dataY2[i] + dataK32[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2,
u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
    datadY2[i] = (dataK12[i] + 2 * dataK22[i] + 2 * dataK32[i] + dataK42[i]) * 1 /
6;

    dataK13[i] = ht*F2(t1, dataY3[i], kt, f, dataY2[i], dataY3[i]);
    dataK23[i] = ht*F2(t1 + ha / 2, dataY3[i] + dataK13[i] / 2, kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
    dataK33[i] = ht*F2(t1 + ha / 2, dataY3[i] + dataK23[i] / 2, kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
    dataK43[i] = ht*F2(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
    dataK53[i] = ht*F2(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
    datadY3[i] = (dataK13[i] + 2 * dataK23[i] + 2 * dataK33[i] + dataK43[i]) * 1 /
6;

```

```

dataY1[i + 1] = dataY1[i] + datadY1[i];
dataY2[i + 1] = dataY2[i] + datadY2[i];
dataY3[i + 1] = dataY3[i] + datadY3[i];
Таблиця1->Rows->Add();

dataGridView1[0, i]->Value = s.ToString("F1");
dataGridView1[1, i]->Value = dataY1[i].ToString("F3");
dataGridView1[2, i]->Value = dataY2[i].ToString("F3");
dataGridView1[3, i]->Value = dataY3[i].ToString("F3");
s += ht;
Таблиця1->Rows->Add();
dataGridView1[0, i]->Value = s;
dataGridView1[1, i]->Value = fe[i];
dataGridView1[2, i]->Value = ff[i];
chart1->Series["Концентрація NO[1]"]->Points->AddXY(fd[i], fe[i]);
chart1->Series["Концентрація NO[2]"]->Points->AddXY(fd[i], ff[i]);
}

datak11[i] = ht*F(t1, dataY1[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2, u0, K, k);
dataK21[i] = ht*F(t1 + ht / 2, dataY1[i] + datak11[i] / 2, dataY1[i],
alfa, p, cc2h2, u0, K, k);
dataK31[i] = ht*F(t1 + ht / 2, dataY1[i] + dataK21[i] / 2, dataY1[i],
alfa, p, cc2h2, u0, K, k);
dataK41[i] = ht*F(t1 + ht, dataY1[i] + dataK31[i], dataY1[i], alfa, p,
cc2h2, u0, K, k);
dataK51[i] = ht*F(t1 + ht, dataY1[i] + dataK31[i], dataY1[i], alfa, p,
cc2h2, u0, K, k);
datadY1[i] = (datak11[i] + 2 * dataK21[i] + 2 * dataK31[i] +
dataK41[i]) * 1 / 6;

datak12[i] = ht*F1(t1, dataY2[i], dataY1[i], alfa, p, cc2h2, u0, K, k,
kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
dataK22[i] = ht*F1(t1 + ha / 2, dataY2[i] + datak12[i] / 2, dataY1[i],
alfa, p, cc2h2, u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
dataK32[i] = ht*F1(t1 + ha / 2, dataY2[i] + dataK22[i] / 2, dataY1[i],
alfa, p, cc2h2, u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
dataK52[i] = ht*F1(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
dataK42[i] = ht*F1(t1 + ha, dataY2[i] + dataK32[i], dataY1[i], alfa,
p, cc2h2, u0, K, k, kt, f, dataY2[i], dataY3[i], dh);
datadY2[i] = (datak12[i] + 2 * dataK22[i] + 2 * dataK32[i] +
dataK42[i]) * 1 / 6;

datak13[i] = ht*F2(t1, dataY3[i], kt, f, dataY2[i], dataY3[i]);
dataK23[i] = ht*F2(t1 + ha / 2, dataY3[i] + datak13[i] / 2, kt, f,
dataY2[i], dataY3[i]);
dataK33[i] = ht*F2(t1 + ha / 2, dataY3[i] + dataK23[i] / 2, kt, f,
dataY2[i], dataY3[i]);
dataK43[i] = ht*F2(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
dataK53[i] = ht*F2(t1 + ha, dataY3[i] + dataK33[i], kt, f, dataY2[i],
dataY3[i]);
datadY3[i] = (datak13[i] + 2 * dataK23[i] + 2 * dataK33[i] +
dataK43[i]) * 1 / 6;

dataY1[i + 1] = dataY1[i] + datadY1[i];
dataY2[i + 1] = dataY2[i] + datadY2[i];
dataY3[i + 1] = dataY3[i] + datadY3[i];
Таблиця1->Rows->Add();

dataGridView1[0, i]->Value = s.ToString("F1");
dataGridView1[1, i]->Value = dataY1[i].ToString("F3");

```

```

dataGridView1[2, i]->Value = dataY2[i].ToString("F3");
dataGridView1[3, i]->Value = dataY3[i].ToString("F3");
s += ht;
Таблиця->Rows->Add();
dataGridView1[0, i]->Value = s;
dataGridView1[1, i]->Value = fe[i];
dataGridView1[2, i]->Value = ff[i];
chart1->Series["Концентрація NO[1]"]->Points->AddXY(fd[i], fe[i]);
chart1->Series["Концентрація NO[2]"]->Points->AddXY(fd[i], ff[i]);
    }
};
}

```

ДОДАТОК В

Анкета-опитування для керівних ТЕС щодо визначення їх бачення можливості використання систем подачі пилу високої концентрації з розрідженням.

Правила заповнення анкети:

- 1) Учасник опитування після обрання того чи іншого варіанту відповіді на питання робить позначку навпроти нього;
- 2) Якщо учасник опитування має власну відповідь на питання, він формулює її письмово у графі «Інша відповідь».

1. Який Ваш досвід роботи в сфері теплоенергетики?	<div>до 3 років - <input type="checkbox"/></div> <div>3-5 років - <input type="checkbox"/></div> <div>5-10 років - <input type="checkbox"/></div> <div>10-20 років - <input type="checkbox"/> Більше 20 років - <input type="checkbox"/></div>
2. Як часто проводяться заміри шкідливих викидів на підприємстві?	<div>1 раз на тиждень - <input type="checkbox"/></div> <div>2-5 разів на тиждень - <input type="checkbox"/></div> <div>5-7 разів на тиждень - <input type="checkbox"/></div> <div>Більше ніж 7 разів - <input type="checkbox"/> ніколи - <input type="checkbox"/></div>
3. Ваше ставлення до екологічного становища навколишнього середовища?	<div>Зацікавлене - <input type="checkbox"/> Нейтральне - <input type="checkbox"/></div> <div>Не цікавить - <input type="checkbox"/></div>
4. До використання якого типу зменшення викидів оксиду азоту ви схильєтесь?	<div>Класичних методів - <input type="checkbox"/></div> <div>Альтернативних методів - <input type="checkbox"/></div>
5. Як ви вважаєте, за якими методами майбутнє?	<div>Класичними методами - <input type="checkbox"/></div> <div>Альтернативними методами - <input type="checkbox"/></div>
6. Чи виникали на підприємстві колись проблеми з викидами шкідливих речовин?	<div>Так - <input type="checkbox"/> Ні - <input type="checkbox"/></div>

7. Які методи, на Ваш погляд, є необхідними для зменшення викидів шкідливих речовин в теплоенергетиці?

8. Які показники якості в системі подачі пилу високої концентрації з розрідженням для Вас є найважливішими?

Продуктивність ☐
 Трудомісткість - ☐ Ціна - ☐
 Корозія котлів - ☐
 Забруднення котлів - ☐

9. Чи потрібно впроваджувати нові технології, що до зменшення викидів оксиду азоту?

так - ☐ Ні - ☐

10. Чи знаєте Ви, що система подачі пилу високої концентрації з розрідженням дозволяє зменшити викиди оксидів азоту до мінімальних показників?

Так - ☐ Ні - ☐

11. Як ви ставитесь до ідеї використання системи подачі пилу високої концентрації з розрідженням для зменшення викидів оксиду азоту?

Негативно - ☐ Скоріше негативно - ☐
 Нейтрально - ☐ Скоріше добре - ☐
 Схвально - ☐

Дякуємо за ваші відповіді!